

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Rakennesuunnittelu

Jenna Lifländer

Tuulettuvien rakenneratkaisujen lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Opinnäytetyö 2018

Tiivistelmä

Jenna Lifländer

Tuulettuvien rakenneratkaisujen lämpö- ja kosteustekninen toiminta, 60 sivua, 4 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Rakennesuunnittelu

Opinnäytetyö 2018

Ohjaajat: lehtori Timo Lehtoviita, Saimaan ammattikorkeakoulu; projektipäällikkö Tomi Pakkanen, Ramboll Finland Oy

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli syventyä tuulettuvien vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan sekä perehtyä Comsol Multiphysics -ohjelmiston käyttöön. Työn lopputuotteena laadittiin tuulettuvan ulkoseinärakenteen laskentamalli Comsol Multiphysics -ohjelmistoa käyttäen. Työn tilaajana toimi suunnittelu- ja konsultointialan yritys Ramboll Finland Oy.

Opinnäytetyön teoriaosassa käydään läpi rakennusfysiikkaan liittyviä ilmiöitä, perehdytään tuulettuvien alapohjien sekä julkisivujen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan sekä syvennytään Comsol Multiphysics -ohjelmiston käyttöön ja käyttökohteisiin. Lisäksi esitetään ohjelmistolla suoritettuja laskelmia ja laskentatuloksia.

Laskennalliset tarkastelut rajattiin koskemaan tuulettuvia julkisivuja. Työssä tutkittiin kahta, toisistaan hiukan poikkeavaa termorankaseinää. Toisessa seinärakenteessa oli käytetty niin kutsuttua sadetakkipeltiä, jonka seurauksena rakenteeseen syntyi kaksinkertainen tuuletusväli. Toisessa seinärakenteessa tuuletusvälejä oli yksi. Simulointi- ja mallinnusprosessin tarkoituksena oli selvittää, millaisia eroja kyseisten rakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa on ja millaista hyötyä kaksinkertaisesta tuuletusvälistä rakenteelle on. Tulosten pohjalta havaittiin, että kaksinkertaisen tuuletusvälin vaikutuksesta rakenteen suhteelliset kosteudet olivat keskimäärin 7 prosenttiyksikköä alhaisemmat kuin toisessa seinärakenteessa.

Opinnäytetyön lopussa on esitelty laskelmista saatuja tuloksia sekä tuloksien pohjalta tehtyä analysointia ja pohdintaa. Lopussa on esitetty myös pohdintaa liittyen Comsol Multiphysicsin käyttöön.

Asiasanat: rakennusfysiikka, lämpö, kosteus, Comsol Multiphysics, tuulettuva julkisivu, ryömintätila, laskennallinen tarkastelu

Abstract

Jenna Lifländer

The heat and moisture behaviour of ventilated structures, 60 pages, 4 appendices

Saimaa University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Civil and Construction Engineering

Structural Engineering

Bachelor's Thesis 2018

Instructors: Mr Timo Lehtoviita, Lecturer, Saimaa University of Applied Sciences, Mr Tomi Pakkanen, Project Manager, Ramboll Finland Oy

The aim of this thesis was to focus on heat and moisture behaviour of ventilated envelope structures in addition to becoming familiarized with the use of Comsol Multiphysics software. As an end product of this thesis, a computation model for exterior wall structures was developed by utilizing the Comsol Multiphysics software. The thesis was ordered by Ramboll Finland Oy.

The theory section of this thesis introduces some phenomena of building physics. Furthermore, it explains the heat and moisture behaviour of both ventilated base floors and facades. Furthermore, the uses of the Comsol Multiphysics software will be focused on. Finally, computations and their results will be presented.

The computational examinations were limited to ventilated facades. The thesis studied two thermo long beam walls, which were slightly different in nature. In the first thermo long beam wall a structure cover plate, which created a dual ventilating space, had been used, whereas the other thermo long beam wall only had a singular ventilating space. In the simulation phase the aim was to discover the moisture differences between these thermo long beam walls with singular and dual ventilating spaces. Furthermore, the goal was to find out what advantages a dual ventilating space offers a structure. The results demonstrated that the relative moisture of the structure was approximately 7 percentages lower in structures with thermo long beam walls that had a dual ventilating space.

The results of computations and their analyses are introduced at the end of this thesis along with discussion. Furthermore, the final chapter includes discussions on the use of Comsol Multiphysics.

Keywords: building physics, heat, moisture, Comsol Multiphysics, ventilated facade, crawl space, computational examination

Sisälllys

1 Johdanto.....	6
2 Lämmön siirtyminen rakenteissa	7
2.1 Johtuminen	7
2.2 Konvektio	8
2.3 Säteily	8
2.4 Kylmäsiilat.....	8
3 Kosteuden siirtyminen rakenteissa	9
3.1 Diffuusio.....	9
3.2 Kosteuskonvektio.....	10
3.3 Veden kapillaarinen siirtyminen	10
3.4 Veden painovoimainen siirtyminen	11
4 Ohjeet ja määräykset.....	11
4.1 Lämpö.....	11
4.2 Kosteus.....	13
4.3 CE-merkinnät.....	14
5 Vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta	15
5.1 Lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan peruseriaatteet	15
5.2 Tuulettuva alapohja.....	17
5.2.1 Tuuletus	17
5.2.2 Rasitusolosuhteet.....	17
5.2.3 Lämpö- ja kosteustekninen toiminta	18
5.3 Tuulettuvat julkisivut.....	19
5.3.1 Rasitusympäristö.....	20
5.3.2 Rakenteen tuuletus ja kuivumiskyky.....	20
5.3.3 Lämpö- ja kosteustekninen toiminta	20
5.4 Keskeiset olosuhdetekijät ja materiaaliominaisuudet	22
5.4.1 Ulkoilman olosuhteet	23
5.4.2 Sisäilman olosuhteet	24
5.4.3 Materiaaliominaisuudet	26
6 Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tarkastelu Comsol Multiphysics -ohjelmistolla	27
6.1 Comsol Multiphysics -ohjelmisto	27
6.1.1 Lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan mallinnusprosessi.....	30
6.2 Vertailulaskelmat.....	31
6.2.1 Lämmön- ja kosteudensiirron laskeminen	31
6.2.2 Virtauslaskenta.....	39
6.3 Kevytrakenteinen ulkoseinä	41
6.3.1 Laskennan kulku	44
6.3.2 Laskentatulokset	51
7 Yhteenvedo ja päätelmät.....	54
Kuvat.....	58
Taulukot.....	58
Lähteet.....	59

Liitteet

Liite 1 Betonisandwich-elementin analyttinen tarkastelu

Liite 2 Comsol Multiphysics laskentaraapotti, sandwich-elementti

Liite 3 Comsol Multiphysics laskentaraapotti, tuulettuva julkisivu

Liite 4 Olosuhdefunktiot

1 Johdanto

Rakennusfysiikka tutkii erilaisia rakenteissa tapahtuvia fysikaalisia ilmiöitä. Pääasiassa keskitytään vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan kiinnitetään jatkuvasti enemmän huomiota ja se on noussut keskeiseksi osaksi rakentamista. Rakenteiden toiminnasta ja käyttäytymisestä tarvitaan jatkuvasti uutta tietoa muun muassa kiristyneiden energiasäästö tavoitteiden sekä rakenteissa esiintyvien vaurioiden takia. Tutkimusten ja saatujen tietojen pohjalta voidaan laatia rakennusfysikaalisesti toimivia rakenneratkaisuja.

Rakennusfysiikan tutkiminen on lisääntynyt merkittävästi viimeisten vuosien aikana. Myös tutkimusmenetelmät ovat kehittyneet ja laskennallista tarkastelua tehdään yhä enemmän. Laskennallisen tarkastelun tueksi on kehitetty useita laskentaohjelmia, jotka kehittyvät ja monipuolistuvat jatkuvasti. Näitä voidaan käyttää myös rakennusfysikaalisissa suunnittelutehtävissä.

Tässä työssä perehdytään tuulettuvien julkisivujen ja alapohjien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan sekä toimintaan vaikuttaviin seikkoihin. Yläpohjarakenteet jätetään tarkastelusta pois. Työssä tehtävät laskennalliset tarkastelut rajattiin koskemaan pelkästään ulkoseinärakenteita. Alapohjarakenteiden osalta keskitytään teoriaan ja perehdytään voimassa oleviin määräyksiin ja ohjeisiin.

Opinnäytetyön lopputuotteena Comsol Multiphysics -ohjelmistolla laaditaan kaksi, toisistaan hiukan poikkeavaa tuulettuvan ulkoseinärakenteen laskentamallia. Tutkittavat rakenteet ovat kevytrakenteisia ulkoseiniä, joiden rankarakenteena toimii termoranka. Toisessa seinärakenteessa on kaksinkertainen tuuletusväli, toinen puolestaan on varustettu yhdellä tuuletusvälillä. Laskennan tarkoituksena on verrata kyseisten rakenteiden kosteusteknistä toimintaa keskenään ja selvittää, millaisia eroja niissä on. Laskentamallit laaditaan työn alla olevan projektin tietoihin nojaten.

Lisäksi opinnäytetyössä tehdään vertailulaskelmia käyttäen sekä Comsol Multiphysics -ohjelmistoa että käsinlaskentaa. Näiden laskentojen tarkoituksena on verrata eri menetelmillä saatuja laskentatuloksia keskenään, jotta voidaan todeta

tulosten paikkansapitävyys. Esimerkkirakenteina toimivat betonisandwich-elementti sekä tuulettuva tiiliverhottu ulkoseinä.

Tiedon kerääminen tapahtuu pääosin jo olemassa oleviin kirjallisiin aineistoin perehtymällä. Lähtöaineistona käytetään esimerkiksi aiheeseen liittyviä kirjoja, laadittuja tutkimusraportteja sekä erilaisia rakennusfysiikkaan liittyviä ohjeita ja määräyksiä.

Comsol Multiphysics -ohjelmiston käyttöön perehtyminen tapahtuu pääosin itsenäisesti opiskellen. Lisäksi opinnäytetyöhön kuului päivänmittainen koulutus, jossa opinnäytetyön tekijä opastettiin alkuun ohjelmiston käytössä. Koulutuksen järjestää Comsol.

Opinnäytetyön tilaajana toimi Ramboll Finland Oy. Ramboll on johtava kansainvälinen suunnittelu- ja konsultointialan yritys. Yritys on perustettu Tanskassa vuonna 1945 ja tällä hetkellä se toimii 35 eri maassa. Globaalisti yritys työllistää 13 000 eri alojen ammattilaista. Suomessa heistä työskentelee tällä hetkellä noin 2300 asiantuntijaa. Ramboll tarjoaa asiantuntijapalveluitaan liittyen infrastruktuuriin, ympäristön sekä rakennusten suunnitteluun, rakennuttamiseen, rakentamiseen ja ylläpitoon sekä johdon konsultointiin. (Ramboll Finland Oy.)

2 Lämmön siirtyminen rakenteissa

Lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan ja tämän seurauksena tapahtuu lämmön siirtymistä. Lämmön siirtyminen voi tapahtua johtumalla, säteilemällä tai konvektion vaikutuksesta. Rakenteissa lämmön siirtymiseen voidaan vaikuttaa rakenneratkaisulla sekä materiaalivalinnoilla. Lisäksi merkittävässä osassa rakenteen ja koko rakennuksen läpi tapahtuviin lämpöhäviöihin ovat kylmäsillat. (Björkholtz 1997; Kylmäsiltaopas 2015.)

2.1 Johtuminen

Keskeisin lämmönsiirtymisilmiö on lämmönjohtuminen, jossa lämpötilaerot pyrkivät tasaantumaan ja lämpö siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan.

Lämpöenergia siirtyy molekyylien liike-energiana molekyylistä toiseen, eli tapahtuu lämmön virtaamista. Johtumista esiintyy nesteissä sekä kiinteissä aineissa. (Björkholtz 1997; Siikanen 2014.)

Rakenteissa lämmönjohtumista voidaan rajoittaa oikeilla materiaalivalinnoilla. Keskeiseen osaan nousee materiaalien lämmönjohtavuus. Rakenteiden lämmöneristeenä tulisi käyttää heikosti lämpöä johtavia materiaaleja, jolloin rakennuksen lämpöhäviöt saadaan pienemmiksi ja vaaditut energiansäästö tavoitteet saavutetaan. (Björkholtz 1997.)

2.2 Konvektio

Konvektiossa lämmön siirtyminen tapahtuu nesteen tai kaasun virtauksen mukana. Konvektio voi olla joko pakotettua tai luonnollista. Pakotetussa konvektiossa neste tai kaasu liikkuu jonkin ulkopuolisen voiman vaikutuksesta. Ulkopuolisia voimia ovat esimerkiksi koneellinen ilmanvaihto ja tuuli. Luonnollisessa konvektiossa taas lämpötilaeroista aiheutuvat tiheyserot saavat aikaan ilman liikkeen. Luonnollista konvektiota tapahtuu eniten pystysuuntaisissa rakenteissa, jolloin ilman pystysuuntainen liike on helpompaa kuin vaakarakenteissa. Täysin luonnollista konvektiota esiintyy rakenteissa harvoin, koska yleensä ulkopuoliset tekijät pääsevät vaikuttamaan konvektion syntyyn. (Björkholtz 1997; Siikanen 2014.)

2.3 Säteily

Säteily on keskeinen lämmönsiirtymismuoto, kun mennään rakennuksen ulkopuolelle. Tällöin lämpö siirtyy sähkömagneettisina aaltoina. Rakennustekniikassa säteilylämpöä esiintyy lyhytaaltoisena auringonsäteilynä sekä pitkäaaltoisena kappaleiden säteilemänä lämpönä. (Siikanen 2014.)

2.4 Kylmäsillat

Kylmäsilloilla tarkoitetaan rakennuksenvaipan kohtia, joissa lämpöä siirtyy ulos huomattavasti enemmän kuin ympäröivissä rakenteissa. Kylmäsillojen vaikutuksesta rakenteen sisäpinnan lämpötila on paikallisesti matalampi kuin muualla ra-

kenteessä, mikä voi johtaa rakenteen homehtumiseen tai kondenssiveden kertymiseen. Kylmäsillat voivat olla joko rakenteellisia tai geometrisia. (Björkholtz 1997; Kylmäsiltaopas 2015.)

Rakenteellisia kylmäsiltoja voi muodostua, kun lämmönjohtavuusominaisuuksiltaan hyvin erilaisia materiaaleja liitetään yhteen. Esimerkkinä on eristekerroksen läpäisevät muuraussiteet. Metallisten siteiden kautta lämpöä virtaa huomattavasti enemmän kuin ympäröivän eristeen kautta. Tällaisia paikallisia ja rakenteen pinta vasten kohtisuorassa kulkevia kylmäsiltoja kutsutaan pistemäisiksi kylmäsiltoiksi. (Kylmäsiltaopas 2015.)

Geometrisia kylmäsiltoja voi taas syntyä siitä kun, lämpöä luovuttava pinta on huomattavasti suurempi kuin lämpöä vastaanottava pinta. Tyypillisesti tällaisia kylmäsiltoja muodostuu rakennuksen nurkkiin. (Kylmäsiltaopas 2015.)

Lisäksi kylmäsiltoja voi muodostua rakenteiden liitoskohtiin. Esimerkkinä tästä olkoon parvekelaatanliitos seinän läpi. Tällaista, rakenteen pinnan suuntaista kylmäsiltaa kutsutaan viivamaiseksi kylmäsilaksi. (Kylmäsiltaopas 2015.)

3 Kosteuden siirtyminen rakenteissa

Kosteutta voi esiintyä rakenteissa kaasuna, nesteinä tai kiinteinä aineina. Veden olomuoto vaikuttaa siihen, kuinka kosteus rakenteissa siirtyy. (Siikanen 2014.)

3.1 Diffuusio

Diffuusiolla tarkoitetaan kosteuden liikkumista vesihöyrynä rakenteen läpi. Vesihöyry siirtyy suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta pienempään. Rakenteissa diffuusio tapahtuu yleensä sisältä ulospäin. Rakenteissa diffuusiota voidaan rajoittaa höyrynsululla, joka estää kosteuden siirtymisen huoneilmasta rakenteisiin. Kerroksellisen rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta vaipparakenteen rakennekerrokset tulee yleensä valita siten, että materiaalien vesihöyrynvastus pienenee sisäpinnasta ulkoilmaan tai tuuletusväliin päin. (Siikanen 2014; RT05-10710 1999.)

Kosteusvaurioiden ehkäisemiseksi rakenteeseen ei saa siirtyä enemmän vesihöyryä kuin mitä sieltä poistuu. Siksi on tärkeää, että uloimmat materiaalikerrokset läpäisevät kosteutta paremmin kuin sisäpuolen kerrokset. Jos rakenteeseen siirtyy enemmän kosteutta kuin mitä sieltä poistuu, voi rakenteeseen tiivistyä haitallisia määriä vettä. (Siikanen 2014; RT05-10710 1999.)

3.2 Kosteuskonvektio

Vesihöyryn konvektiolla eli kosteuskonvektiolla tarkoitetaan kaasuseoksen sisältämän vesihöyryn siirtymistä kaasuseoksen mukana sen liikkuesssa paine-erojen vaikutuksesta. Konvektiota tapahtuu huokoisissa ja hyvin ilmaa läpäisevissä rakenteissa. Myös vesihöyryn konvektiota voi tapahtua ulkopuolisen voiman (pakotettu konvektio) tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen (luonnollinen konvektio) vaikutuksesta. Konvektiota voidaan rajoittaa rakenteen sisäosan ilman-
sululla. (Siikanen 2014; RT05-10710 1999.)

Yleensä kosteusvaurioriski muodostuu kylmänä ajanjaksona, jolloin kosteaa sisäilmaa virtaa rakenteisiin ja ilman sisältämä kosteus alkaa tiivistyä rakenteiden sisään. Tyypillisesti ongelma kohdistuu yläpohjarakenteisiin. Tämä johtuu siitä, että rakennuksen painesuhteet ovat yleensä sellaiset, että rakennuksen yläosa on ylipaineinen. Paine-erot ulko- ja sisäilman välillä pyrkivät tasoittumaan ja ylipaineen vaikutuksesta ilmaa virtaa voimakkaammin sisältä ulospäin. (Siikanen 2014; RT05-10710 1999.)

3.3 Veden kapillaarinen siirtyminen

Kapillaarivirtauksella tarkoitetaan huokosalipaine-eron aiheuttamaa nestemäisen veden siirtymistä aineen huokosissa. Kapillaarista veden siirtymistä tapahtuu yleensä, kun materiaali on kosketuksessa vapaaseen veteen tai toiseen kapillaarisella kosteusalueella olevaan materiaaliin. Kapillaarista siirtymistä voi tapahtua rakenteessa kaikkiin suuntiin. (Ympäristöopas 2016.)

Veden kapillaarisella nousukorkeudella tarkoitetaan kosteustasapainotilaa, jossa kosteus on noussut siihen pisteeseen, että huokosalipaine ja maan vetovoima ovat tasapainossa. Vaakasuunnassa kapillaarista siirtymistä tapahtuu, kun vettä

siirtyy suurempihuokoisesta materiaalista pienempihuokoiseen materiaaliin. (Ympäristöopas 2016.)

3.4 Veden painovoimainen siirtyminen

Painovoimainen siirtyminen tarkoittaa nestemäisessä muodossa olevan veden siirtymistä painovoiman vaikutuksesta alaspäin. Painovoimaista siirtymistä voidaan käyttää hyväksi muun muassa johdettaessa vesiä pois päin rakennuksesta, vesikattopinnoilla, viemäreissä sekä märkätilojen lattioissa. Rakenteiden sekä esimerkiksi maanpinnan kaltevuuksilla sekä kallistuksilla vesi voidaan johtaa haluttuun suuntaan. (Siikanen 2014.)

4 Ohjeet ja määräykset

Rakentamista koskevia määräyksiä ja ohjeita annetaan Ympäristöministeriön ylläpitämässä Suomen rakentamismääräyskokoelmassa. Asetukset uudistuivat vuoteen 2018 mennessä. Uudistuksen tavoitteena on, että rakentamista koskevat säädökset olisivat mahdollisimman selkeitä ja yhteneväisiä keskenään. Rakentamismääräykset tarkentavat Maankäyttö- ja rakennuslaissa asetettuja vaatimuksia.

4.1 Lämpö

Rakennuksen lämpötekniiseen toimintaan liittyviä määräyksiä käsitellään Ympäristöministeriön säädöskokoelmissa 1009/2017 (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta) sekä 1010/2017 (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta).

Rakennus suunnitellaan vastaamaan käyttötarkoituksen asettamia vaatimuksia. Lämmön- sekä kosteudeneristyksen suunnittelussa on varmistettava, että rakennuksen sisäilmasto on käyttötarkoituksensa mukainen eikä tilan käytöstä saa aiheutua vaaraa tai haittaa ihmisille. Rakennukset on myös suunniteltava riittävän ilmanpitäviksi. Ilmanpitävät rakenteet parantavat myös rakennuksen lämpötekniistä toimintaa. Vaipan ilmanvuotoluku (q_{50}) ei saa ylittää arvoa $4,0 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$.

Keskeisessä osassa rakennuksen lämpötekni­sen toiminnan kannalta ovat rakennuksen ja rakenteiden lämpöhäviöt. Lämpöhäviöiden suuruus ei saa ylittää vertailulämpöhäviön arvoa. Lämpöhäviöiden laskennassa esille nousee rakenteiden lämmönläpäisykertoimet eli U-arvot. Eri rakennusosille on määritetty lämmönläpäisykertoimien vertailuarvoja, joita tulee käyttää laskettaessa vaipan vertailulämpöhäviötä. Käytännössä näitä voidaan pitää lämmönläpäisykertoimen raja-arvoina. Vertailuarvoista voidaan kuitenkin poiketa, jos tasauslaskennassa voidaan osoittaa, että rakennuksen kokonaislämpöhäviö alittaa vertailulämpöhäviön arvon.

Nykyään voimassa olevat alapohjan lämmönläpäisykertoimen vertailuarvot ovat seuraavat:

- Lämpimät ja jäähdytettävät kylmät tilat 0,17 W/(m² K)
- Puolilämpimät tilat 0,26 W/(m² K)
- Loma-asumiseen tarkoitetut tilat 0,19 W/(m² K)

Nykyään voimassa olevat ulkoseinän lämmönläpäisykertoimen vertailuarvot ovat seuraavat:

- Lämpimät ja jäähdytettävät kylmät tilat 0,17 W/(m² K)
- Puolilämpimät tilat 0,26 W/(m² K)
- Loma-asumiseen tarkoitetut tilat 0,24 W/(m² K)

Lisäksi lämmönläpäisykertoimen vertailuarvot on määritetty erikseen massiivipuuseinälle. Tällöin vertailuarvot ovat seuraavat:

- Lämpimät ja jäähdytettävät kylmät tilat 0,40 W/(m² K)
- Puolilämpimät tilat 0,60 W/(m² K)
- Loma-asumiseen tarkoitetut tilat 0,80 W/(m² K)

Rakenteiden U-arvot lasketaan standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukaan.

Lämmönläpäisykertoimen vertailuarvot ovat kiristyneet vuosien aikana. Taulukossa 1 on esitetty seinärakenteiden U-arvo vaatimuksia eri vuosina. Taulukon

arvot perustuvat eri vuosien Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C3 vaatimuksiin.

	1976 k-arvo	1978 k-arvo	1985 k-arvo	2003 U-arvo	2007 U-arvo	2010 U-arvo	2018 U-arvo
Lämpimät tilat	0,40 ⁽¹⁾ 0,70 ⁽²⁾	0,29 ⁽¹⁾ 0,35 ⁽²⁾	0,28	0,25	0,24	0,17	0,17
Puolilämpimät tilat	-	0,60	0,45	0,40	0,38	0,26	0,26

⁽¹⁾ Seinä, jonka massa $\leq 100 \text{ kg/m}^2$

⁽²⁾ Seinä, jonka massa $> 100 \text{ kg/m}^2$

Taulukko 1. Ulkoseinärakenteiden lämmönläpäisykertoimien $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})]$ kehittyminen

Tietoa eri aikoina käytetyistä rakenteiden lämmönläpäisykertoimen vertailuarvoista on saatavilla vuodesta 1976 alkaen Ympäristöministeriön verkkosivuilta. Taulukosta 1 voidaan havaita vertailuarvoissa tapahtuneet muutokset. Taulukosta voidaan havaita myös se, että vuonna 1985 tai sitä aiemmin voimaantulleissa määräyksissä on U-arvon sijaan käytetty k-arvoa. K-arvo vastaa ominaisuuksiltaan U-arvoa ja se muutettiin nykyisin käytössä olevaksi U-arvoksi vuonna 2003. Verrattaessa esimerkiksi vuoden 1976 ja vuoden 2018 vaadittuja eriste määriä voidaan havaita, että eristekerroksen paksuus on yli kaksinkertaistunut sinä aikana.

Vuoden 1976 ohjeissa on määritetty, että k-arvovaatimus saa ylittyä rakenteen pienellä osalla, mikäli se on tarpeellista esimerkiksi rakenteen lujuuden kannalta. Vuosina 1978–2010 seinärakenteen U-arvo saa olla suurimmillaan $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Uusimmissa, vuoden 2018 ohjeissa U-arvolle on määritetty vain vertailuarvon suuruus.

4.2 Kosteus

Kosteustekniseen toimintaan liittyviä ohjeita ja määräyksiä on annettu Ympäristöministeriön säädöskokoelmassa 782/2017 (Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta).

Rakennuksen on täytettävä käyttötarkoituksen mukaiset vaatimukset myös kosteusteknisen toiminnan osalta. Kosteuden haitallinen pääsy rakenteisiin on estettävä ja vaipparakenteen tulee toimia rakennusta suojaavana kokonaisuutena.

Tuuletettujen rakenteiden osalta on varmistettava, että tuuletustila tai -väli tuulettuu kokonaisuudessaan, eikä sinne jää tuulettumattomia tai suljettuja alueita.

Tuulettuva alapohja

Ryömintätilainen alapohja toteutetaan siten, ettei ryömintätilaan pääse kertymään vettä. Ryömintätilaan on järjestettävä tuuletus eikä ryömintätilassa oleva kosteus saa haitata rakenteen toimintaa. Lisäksi ryömintätilan tulee olla vähintään 800 mm korkea ja sinne on oltava pääsy tarkastuksia sekä huoltotöitä varten.

Ulkoseinärakenteet

Ulkoseinän ja sen kerrosten on muodostettava kokonaisuus, joka estää kosteuden haitallisen pääsyn rakenteeseen. Sisäilman vesihöyryn diffuusio tai konvektio eivät saa aiheuttaa vaurioita seinärakenteen kosteustekniselle toiminnalle. Ulkoverhouksen taakse päässeeseen veteen tulee pystyä kuivumaan tai vesi on pystyttävä ohjaamaan seinärakenteesta hallitusti pois.

4.3 CE-merkinnät

CE-merkityistä tuotteista sekä tuotteiden vaatimuksia löytyy tietoa Ympäristöministeriön Rakennustuotteiden tuotehyväksynnät -osiosta. Tuotteen CE-merkintä on valmistajan ilmoitus siitä, että tuote täyttää sitä koskevat Euroopan unionin asettamat vaatimukset. CE-merkittyjen tuotteiden ominaisuudet ilmoitetaan eurooppalaisen harmonisoidun tuotestandardin tai eurooppalaisen teknisen arvioinnin mukaisesti.

Nykyisin lähes kaikilta rakennustuotteilta vaaditaan CE-merkintä. CE-merkintä tuli pakolliseksi suurimmalle osalle rakennustuotteita, kun Euroopan unionin rakennustuoteasetus tuli kokonaisuudessaan voimaan heinäkuussa 2013. CE-merkintä osoittaa, että tuote on testattu harmonisoidun tuotestandardin mukaisesti ja tuote on ilmoitetun suoritustason mukainen.

Tuotteiden CE-merkinnöillä pyritään parantamaan rakennustuotteiden vertailukelpoisuutta. Tuotteita on helppo verrata keskenään, kun niiden ominaisuudet ilmoitetaan samalla tavalla. Lisäksi CE-merkintä mahdollistaa tuotteiden myynnin myös muualle Eurooppaan ilman erillisiä maakohtaisia lisäselvityksiä.

5 Vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta

5.1 Lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan peruseriaatteen

Vaipparakenteilla tarkoitetaan rakennuksen ulkoilmaan tai maapohjaan rajoittuvia rakenneosia. Rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta vaipparakenteiden päätehtävänä on suojata rakennuksen sisätiloja ulkopuolisilta kosteusrasituksilta. Lisäksi vaipparakenteet eristävät lämpöä ja ääntä. Lähtökohtana rakennusfysikaalisessa suunnittelussa on luoda toimivia rakenteita, jotka täyttävät niille asetetut lämpö- ja kosteustekniset vaatimukset. (RIL 255-1-2014.)

Vaipparakenteita rasittavat niin rakennuksen sisäiset kuin ulkoisetkin kuormitustekijät. Rakenteita suunniteltaessa on tärkeää löytää rakenteen toiminnan kannalta kriittiset olosuhteet ja ymmärtää niiden vaikutukset rakenteen sekä koko rakennuksen toimintaan. (RIL 255-1-2014.)

Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisellä toiminnalla tarkoitetaan sitä, miten rakenne käyttäytyy, kun sen läpi tapahtuu lämmön- ja kosteuden siirtymistä. Lämmön- ja kosteudensiirtymistä tapahtuu aina, mutta oikeanlaisilla rakenneratkaisuilla ja materiaalivalinnoilla voidaan välttää niiden aiheuttamia vaurioita. Rakenne on siis lämpö- ja kosteusteknisesti toimiva, kun lämmön- ja kosteuden siirtyminen sen läpi ei aiheuta vauriota eikä muita haittoja. (RIL 255-1-2014.)

Lämmön- ja kosteudensiirtymisen välillä vallitsee yhteys, jonka vuoksi lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa on syytä tarkastella rinnakkain. Esimerkiksi suhteellinen kosteus on riippuvainen paitsi ilmanvesihöyrypitoisuudesta, myös lämpötilasta. Lisäksi lämpötila vaikuttaa myös rakenteiden kuivumiskäyttäytymiseen. Tämän takia lämpötilan vaihtelut vaikuttavat paitsi rakenteen lämpötekniiseen toimintaan myös rakenteen kosteustekniseen käyttäytymiseen. (RIL 255-1-2014.)

Lämpötekni­sen toimivuuden kannalta rakenteiden on täytettävä niille asetetut lämmönläpäisykertoimen vertailuarvotavoitteet. Lämmönläpäisykertoimen vertailuarvovaatimuksen täyttyminen vaatii rakenteelta lämmöneristyskykyä ja tätä voidaan kuvata materiaalien lämmönjohtavuuksien avulla. Lämmönjohtavuus on materiaalien tärkein lämpö­tekni­nen ominaisuus. Mitä pienempi materiaalin lämmönjohtavuus on, sitä paremmin se eristää lämpöä. Lämmöneristeiden asennus on tehtävä myös huolellisesti, jotta eristekerros pysyy yhtenäisenä ja toimii suunnitellulla tavalla. (RIL 255-1-2014.)

Rakenteiden ilmatiiveys ja tuulensuojaus ovat tärkeitä rakenteen kosteustekni­sen toiminnan kannalta, mutta samalla ne kuitenkin myös parantavat rakenteen lämpö­tekni­stä toimintaa ja pienentävät vaipan lämpöhäviöitä. Tuulettuvissa vaipparakenteissa eristeen tuulensuojaus on erityisen tärkeää, koska tuuletuksen tai välin kautta tapahtuvat ilmavirtaukset heikentävät lämmöneristeen eristyskykyä ja mahdollistavat myös kosteuden pääsyn rakenteeseen. Tuulensuojaustarve vähenee, jos eristeen ilmanläpäisevyys on niin pieni, ettei konvektiovirtausta pääse tapahtumaan. (RIL 255-1-2014.)

Rakenteiden kosteustekni­sellä toiminnalla pyritään takaamaan rakennuksen terveellisyys ja turvallisuus. Oikein suunnitellut ja toteutetut rakenneratkaisut mahdollistavat sen, ettei rakennuksen käyttäjien terveydelle aiheudu vaaraa tai haittaa rakennuksessa olemisesta. Kosteustekni­sessä suunnittelussa kiinnitetään huomiota kosteudenhallintaan sekä rakenteiden kuivumiskyvyn parantamiseen. Rakenteen kosteustekni­nen toiminta paranee oikeilla, hyvin suunnitelluilla ja toteutetuilla rakenneratkaisuilla. On suositeltavaa käyttää jo olemassa olevia perusratkaisuja, joiden toimivuus on pystytty osoittamaan kokemusperäisesti tai tutkimusten avulla. Tällaisia rakenneratkaisuja löytyy muun muassa RT-kortistosta sekä tuotevalmistajien sivuilta. (RIL 255-1-2014.)

Vaipparakenteiden eri kerrokset tulisi valita siten, että niiden vesihöyryn vastus pienenee siirryttäessä sisältä ulospäin. Tällä voidaan parantaa rakenteen kuivumiskykyä sekä rakenteen kosteustekni­stä toimintaa. Rakenteen toimintaa tarkastellaan erilaisissa rasitusoloissa, jotta voidaan uskottavasti todeta rakenteen toimivuus niin lämpö- kuin kosteustekni­sestikin. (RIL 255-1-2014.)

5.2 Tuulettuva alapohja

Tuulettuva eli ryömintätilainen alapohja on rakenne, jossa lattian ja maapohjan välissä on tarkoituksellinen tuuletustila. Ryömintätilaista rakennetta käytetään esimerkiksi silloin, jos rakennus täytyy perustaa paaluille. Alapohjarakenne toimii siis kantavana. Ryömintätila tulee puhdistaa orgaanisista aineista rakentamisen yhteydessä, jottei tilaan synny epäpuhtauksia. Ryömintätilan epäpuhtaudet voivat kulkeutua sisäilmaan. Rakenteen toiminnan kannalta on myös huolehdittava rakenteen riittävästä ilmatiiveydestä sekä oikein mitoitetusta tuuletuksesta. (RIL 255-1-2014.)

5.2.1 Tuuletus

Ryömintätilaisen alapohjan kosteusteknisen toiminnan kannalta on tärkeää huolehtia tilan riittävästä tuuletuksesta. Yleensä tuuletus tapahtuu painovoimaisesti perusmuurin tuuletusaukkojen kautta suoraan ulkoilmaan, mutta tarvittaessa voidaan käyttää myös koneellista ilmanvaihtoa. Koneellista ilmanvaihtoa käytetään yleensä silloin kun ryömintätilan tilavuus on suuri. (RIL 255-1-2014.)

Tuuletuksen suuruus on suunniteltava tapauskohtaisesti, mutta tavoiteltavana ilmanvaihtona voidaan pitää 0,5–1 kertaa tunnissa. Tuuletusaukot sijoitetaan niin, että koko ryömintätila tuulettuu, eikä sinne jää tuulettumattomia alueita. Yksittäisen tuuletusaukon tehollinen vähimmäiskoko on 150 cm². Tuuletusaukkojen määrään vaikuttaa rakennuspaikan sijainti, vallitsevat olosuhteet sekä tuulettuvan alapohjan koko. Tuulisilla paikoilla tuuletusaukkojen suositeltu määrä on 0,5 ‰ alapohjan pinta-alasta, tavanomaisilla rakennuspaikoilla vastaava luku on 1 ‰. (RIL 107-2012.)

5.2.2 Rasitusolosuhteet

Alapohjarakenteiden rasitusolot muodostuvat pääasiallisesti ympäröivän maapohjan olosuhteista. Lisäksi rakenteen toimintaan vaikuttaa ulko- ja sisäilman olosuhteet sekä rakennuskosteus. Ryömintätilaisissa alapohjissa valitseviin olosuhteisiin vaikuttaa myös tilan tuuletus, maanpintakerrosten kapillaarisuus, pohjaveden taso, maanpinnan lämmöneristys sekä alapohjan läpi tapahtuvat lämpövirrat. (RIL 255-1-2014.)

Tyypillisesti ryömintätilan olosuhteet muuttuvat hitaasti ulkoilman olosuhteisiin nähden ja tämä aiheuttaa rakenteiden kosteustekniselle toiminnalle lisää haasteita. Merkittävässä osassa on vuodenaikojen mukaan muuttuvat lämpötilat ja olosuhteet. (RIL 255-1-2014.)

Maan suuren lämpökapasiteetin takia ryömintätilan olosuhteet muuttuvat viiveellä ulkoilmaolosuhteisiin nähden. Suurimman haasteen tämä aiheuttaa siirryttäessä talvesta kesään. Talven jäljiltä maapohja on viileämpi kuin ryömintätilaan tuleva ilma ja tämän seurauksena ilma luovuttaa lämpöä maapohjaan. Ilman viiletessä sen suhteellinen kosteus nousee ja kosteuden vaikutuksesta ryömintätilassa voi vallita homehtumiselle alttiit olosuhteet ($RH \geq 75 - 80 \%$). Lisäksi sinne voi kondensoitua eli tiivistyä vettä. Tämä tulee huomioida rakenteen suunnittelussa ja materiaalivalinnoissa. (RIL 255-1-2014; RIL 250-2011.)

Lisäksi alapohjarakenteita rasittaa myös maaperässä esiintyvä radon. Radon on ihmisille haitallinen radioaktiivinen jalokaasu, jota syntyy jatkuvasti maan kuorella ja kiviaineksessa. Radonin pääsy sisäilmaan on estettävä. (RIL 255-1-2014.)

5.2.3 Lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Ryömintätilan ajoittain vaativat kosteusolosuhteet edellyttävät materiaaleilta kestävyyttä. Esimerkiksi lämmöneristeen on täytettävä sille asetetut lämpötekniset vaatimukset sekä kestävä vaativat kosteusolot. Alapohjan lämmöneriste kannattaa sijoittaa rakenteen alapintaan, jolloin lattian kantavarakenne säilyy lämpimänä ja välttyy pahimmilta kosteusrasituksilta. (RIL 255-1-2014.)

Ryömintätilan olosuhteita voidaan parantaa sijoittamalla ryömintätilan pohjaan eristekerros, tämä voi olla esimerkiksi kevytsoraa tai vaahtolasia. Lämmöneristyskerros estää ilmaa luovuttamasta lämpöä maapohjaan. Samalla se myös pitää maapohjan viileänä, jolloin sen kyky haihduttaa kosteutta ilmaan vähenee. Näin ryömintätilan suhteellinen kosteus ei pääse nousemaan korkeaksi yhtä helposti. (RIL 255-1-2014.)

Lämpö- sekä kosteusteknisen toiminnan kannalta on tärkeää huolehtia myös alapohjarakenteen riittävästä ilmatiiveydestä. Tiivis rakenne pienentää alapohjan

läpi tapahtuvia lämpöhäviöitä sekä estää myös kosteuden kulkeutumisen rakenteen läpi. Lisäksi rakenteen tiiveys on välttämätöntä maaperästä tulevan radonin torjunnan kannalta. Ryömintätilan tuuletus ehkäisee myös osaltaan radonin kulkeutumista rakenteisiin ja tätä kautta sisäilmaan. (RIL 255-1-2014.)

Kosteusteknisen toiminnan kannalta on tärkeää huolehtia myös maapohjan kuivatuksesta. Sade- ja sulamisvedet ohjataan rakennuksesta pois päin kallistuksella 1:20. Veden kapillaarinen nousu maasta estetään esimerkiksi kapillaarikatkon tai salaojakerroksen avulla. Salaojien avulla estetään myös pohjaveden haitallinen nousu. Kiristyvät energiansäästötavoitteet vaativat rakenteilta jatkuvasti parempaa lämmöneristyskykyä. Ryömintätilaisessa alapohjarakenteessa suuret eristemäärät kuitenkin heikentävät rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Lämmöneristyskerroksen takia ryömintätilan olosuhteet pysyvät kylmempinä pidempään, jolloin myös tilan suhteellinen kosteus nousee. (RIL 107–2012.)

Rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa merkittävästi oikeilla materiaalivalinnoilla sekä huolehtimalla rakenteen ilmatiivyydestä. Rakenteen sisäpinnan höyrynvastuksen sekä ulkopinnan lämmönvastuksen on oltava riittävät. Maanpinnan eristäminen vähentää myös kriittisimpien olosuhteiden esiintymistä. Ryömintätilan maanpinta olisi suositeltavaa eristää vähintään noin $R = 1,4 \text{ m}^2\text{K/W}$ lämmönvastuksella. (RIL 255-1-2014; TTY Tutkimusraportti 159 2013.)

5.3 Tuulettuvat julkisivut

Tuulettuva julkisivu on rakenne, jossa ulkokuoren tai -verhouksen takana on tuuletusväli. Tuuletusväli on suoraan yhteydessä ulkoilmaan ja rakenteen toiminnan kannalta on varmistettava, että tuuletus on yhtenäinen eikä sinne jää tuulettumattomia alueita. Tuuletusvälin minimisyvyys on 20 mm, mutta suositeltavaa on käyttää vähintään 30 mm tuuletusväliä. Lisäksi tuuletusvälin syvyys vaihtelee käytettyjen materiaalien mukaan. Rakenteen tuuletus voidaan hoitaa myös käyttämällä uritettua lämmöneristettä, mutta kosteusteknisen toiminnan kannalta yhtenäinen tuuletusväli on paras vaihtoehto. (BY 64 2016.)

Lähtökohtana suunnittelussa on, että rakenteen tulee kestää siihen kohdistuvat rasitukset koko sen suunnitellun käyttöiän ajan. Rakenteeseen kohdistuvia rasituksia voidaan hallita detaljisuunnittelulla sekä oikeanlaisilla materiaalivalinnoilla. (BY 64 2016; RIL 255-1-2014.)

5.3.1 Rasitusympäristö

Julkisivurakenteen rasitusympäristö muodostuu ulkoilmasta ja sen ominaisuuksista sekä rakennuksen sisäpuolisista olosuhteista. Ulkoilman olosuhteet voivat ajoittain olla hyvinkin vaativia ja ne voivat muodostaa ulkoseinärakenteelle voimakkaita rasituksia. Olosuhdetekijöitä käsitellään tarkemmin kohdassa *5.4 Keskeiset olosuhdetekijät ja materiaaliominaisuudet*. (RIL 255-1-2014.)

5.3.2 Rakenteen tuuletus ja kuivumiskyky

Tuuletus parantaa rakenteen kuivumiskykyä sekä kosteusteknistä toimintaa. Tuuletusvälin ansiosta seinärakenteen ulko-osa pääsee kuivumaan molempiin suuntiin, jolloin kuivuminen on huomattavasti tehokkaampaa kuin tuulettumattomissa rakenteissa, joissa kuivuminen tapahtuu vain ulospäin. Sateen vaikutuksesta tuuletusväliin voi ajoittain päästä vettä. Rakenteen suunnittelussa ja toteutuksessa onkin huolehdittava, että tuuletusväliin joutunut kosteus pääsee poistumaan rakenteesta haittaa aiheuttamatta. (RIL 255-1-2014.)

Tuuletusvälin rakennetta kuivattava vaikutus perustuu myös siellä kiertävään ilmaan. Yleisesti ottaen tuuletusväliin tuleva ilma lämpenee, jolloin sen suhteellinen kosteus alenee. Suhteellisen kosteuden aletessa ilma pystyy sitomaan itseensä enemmän kosteutta ja tätä kautta poistamaan sitä rakenteesta. (RIL 255-1-2014.)

5.3.3 Lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Julkisivurakenteet ovat alttiina useille erilaisille kosteusrasituksille, joita ovat muun muassa sade, ulko- ja sisäilman kosteus, maaperän kosteus sekä rakennuskosteus. Rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta myös muilla olosuhdetekijöillä kuten tuulisuudella, lämpötiloilla ja rakenteen yli vaikuttavilla paine-eroilla on merkitystä. (RIL 255-1-2014.)

Ulkoseinärakenteen lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan kannalta rakenteen ilmatiiveys on tärkeässä osassa. Tiivis rakenne estää kosteuden haitallisen kulkeutumisen rakenteessa sekä pienentää rakenteen läpi tapahtuvaa lämpöhäviötä. (RIL 255-1-2014.)

Lämpötekkinen toiminta

Lämmöneristyksellä vaikutetaan rakennuksen sisäpuolisiin olosuhteisiin. Tuulettuvissa rakenteissa on erityisen tärkeää huolehtia eristeen tuulensuojauksesta. Tuulensuojan käyttö vähentää tuuletusväliässä kiertävän ilman siirtymistä eristekerrokseen. Lämmöneristeessä tapahtuvat ilmavirtaukset heikentävät lämmöneristeen eristyskykyä ja virtauksen mukana eristeeseen voi siirtyä myös kosteutta. (BY 64 2016; RIL 255-1-2014.)

Seinärakenteen ulkokuori kiinnitetään usein kantavaan runkoon mekaanisilla kiinnikkeillä eristeen läpi. Rakenteen lämmöneristys on heikompi kiinnikkeiden kohdassa ja näitä kohtia kutsutaan kylmäsilloiksi. Kylmäsillat otetaan paikallisesti huomioon rakenteen lämmönläpäisykertoimen eli U-arvon laskennassa. (RIL 255-1-2014.)

Lämpö siirtyy seinärakenteen pinnoissa johtumalla ja säteilyllä. Ulkopintaan vaikuttava auringonsäteily on suoraan suhteessa rakennuksen sijaintaan sekä ilmansuuntiin. Auringon lämmittävä ja kuivattava vaikutus on heikointa rakennuksen pohjoisseinällä. Säteilyn määrään vaikuttaa myös ympäröivän maaston muodot sekä kasvillisuus. (RIL 255-1-2014.)

Seinärakenteen sisällä lämmön siirtyminen tapahtuu johtumalla tai konvektion vaikutuksesta. Kiristyvien energiasäästötavoitteiden takia käytetään jatkuvasti paksumpia eristekerroksia, jolloin seinän läpi siirtyvä lämpöenergian määrä vähenee. Nykyisillä lämmöneristysvaatimuksilla toteutetut rakenteet eristävät lämpöä paremmin kuin aikaisemmat vaatimusten mukaan toteutetut rakenteet. Paksu eristekerros heikentää kuitenkin rakenteen kuivumiskykyä ja voi aiheuttaa rakenteeseen kosteusvaurioita. (RIL 255-1-2014.)

Paksut yhtenäiset eristekerrokset voimistavat myös sisäistä konvektiota. Sisäisellä konvektiolla tarkoitetaan luonnollista konvektiota, joka tapahtuu huokoisessa materiaalissa. Tyypillisesti se syntyy lämpötilaerojen vaikutuksesta. (RIL 255-1-2014.)

Kosteustekninen toiminta

Ulkoseinärakenteen ulkopinnan on kestettävä ajoittain vaativiakin sääolosuhteita. Ulkopinta suojaa seinärakenteen muita rakennekerroksia ulkopuolisilta kosteusrasituksilta. Voimakkaan viistosateen aikaan ulkoverhouksen taakse voi kuitenkin päätyä vettä. Tässä kohtaa seinärakenteen tuulensuoja estää kosteuden haitallista kulkeutumista sisempiin rakennekerroksiin. Tuulensuojamateriaalin on kuitenkin oltava riittävän vesihöyryä läpäisevä, jottei sen sisäpintaan muodostu kriittisiä kosteusoloja sisäpuolisten kosteuslähteiden vaikutuksesta. (RIL 255-1-2014.)

Rakennuksen sisäpuolinen kosteus pyrkii siirtymään rakenteeseen diffuusion vaikutuksesta. Diffuusiota voidaan estää höyrynsulun avulla. Höyrynsulku sijoitetaan rakenteen sisäosaan. (RIL 255-1-2014.)

5.4 Keskeiset olosuhdetekijät ja materiaaliominaisuudet

Rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan vaikuttavat niin rakenteen sisäiset, kuin ulkoisetkin tekijät. Rakenteen toimintaan vaikuttavat merkittävästi ulko- ja sisäilman olosuhteet sekä käytettyjen materiaalien materiaaliominaisuudet. (RIL 255-1-2014.)

Määritettäessä vallitsevia olosuhteita on pyrittävä löytämään rakenteen toiminnan kannalta kriittiset olosuhdetekijät. Olosuhteiden kriittisyyttä voidaan arvioida määritettyjen toimintakriteerien pohjalta. Toimintakriteerien ja erinäisten raja-arvojen perusteella voidaan todeta, että rakenne täyttää sille asetetut vaatimukset. Olosuhteiden vaikutuksia voidaan arvioida tekemällä erilaisia laskentatarkasteluja. (RIL 255-1-2014.)

Laskennan tarkkuustason parantamiseksi on tärkeää huolehtia siitä, että rakenteen toimintaan vaikuttavat suureet on määritetty oikein ja riittävän tarkasti. Rakennusfysiikan kannalta merkittävimmät asiat ovat ulko- ja sisäilman olosuhteet

sekä materiaaliominaisuudet. Lisäksi rakenteen ja rakennuksen toiminnalla määritetään toimintakriteerit ja raja-arvoja, joiden pohjalta voidaan todeta, että rakenne täyttää sille asetetut vaatimukset. (RIL 255-1-2014.)

5.4.1 Ulkoilman olosuhteet

Rakennusfysiikan kannalta ulkoilman keskeisimmät olosuhdetekijät ovat lämpötila, sade, ilman suhteellinen kosteus, auringonsäteilyn määrä sekä lämpösäteily taivaalle. Vallitseviin olosuhteisiin vaikuttaa muun muassa rakennuksen maantieteellinen sijainti, ympäröivät rakennukset sekä kasvillisuus, vuodenajat sekä tarkastelevat ilmansuunnat. (RIL 255-1-2014.)

Rakenteen toiminnan arvioimiseksi ulkoilmanolosuhteiksi pyritään valitsemaan mahdollisimmat kriittiset olosuhteet. Joissain tapauksissa käytetään myös keskimääräisiä olosuhdetekijöitä, esimerkiksi laskettaessa energiankulutusta. Ulkoilman olosuhteet kuvataan yleensä rakennusfysikaalisten ilmastollisten testivuosien avulla. (RIL 255-1-2014.)

Rakennusfysikaalisiksi testivuosiksi nykyilmastossa on valittu Jokioisen 2004 ja Vantaan 2007 ulkoilman olosuhteet. Rakennusfysiikan testivuosien valinta oli osa Tampereen Teknillisen yliopiston FRAME-tutkimusprojektia. Valittujen testivuosien sääolosuhteet olivat selvästi tavanomaista sääolosuhteita suotuisampia homeen kasvuille ja kosteuden tiivistymiselle rakenteisiin. Ilmatieteenlaitos on laatinut testivuosista sääaineiston nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Tulevaisuuden ilmasto-olosuhteet on määritetty vuosille 2030, 2050 ja 2100. (RIL 255-1-2014.)

Testivuodet on määritetty huomioiden ulkoilman keskeiset olosuhdetekijät rakennusfysiikan kannalta. Käyttämällä testivuosien sääaineistoa osana rakennusfysikaalista suunnittelua, voidaan uskottavasti todeta rakenteen toiminta vallitsevissa olosuhteissa. Lisäksi on mahdollista selvittää muuttuvien olosuhteiden vaikutus rakenteen toimintaan tulevaisuuden ilmastodataa käyttäen. Testivuodet huomioivat seuraavat ulkoilman olosuhdetekijät:

- Lämpötila [°C]
- Suhteellinen kosteus [%]

- Tuulen nopeus [m/s]
- Tuulen suunta
- Kokonaissäteily vaakapinnalle [W/m^2]
- Hajasäteily vaakapinnalle [W/m^2]
- Suora säteily kohtisuoralle pinnalle [W/m^2]
- Sademäärä [mm/h]

Rakenteiden toimintaa on kuitenkin aina arvioitava myös tapauskohtaisesti. Valitsevat olosuhteet voivat ajoittain olla haastavammat kuin mitä testivuosi aineistot osoittavat. Jossain tapauksissa ajoittain vaativat sääolosuhteet voivat aiheuttaa haittaa rakenteen toiminnalle. Mahdolliset ilmastolliset poikkeamat on otettava huomioon suunnittelussa ja tulosten tulkinnassa. (RIL 255-1-2014.)

Tässä työssä ulkoilman olosuhteina käytetään Jokioisen 2004 testivuotta. Yleensä Jokioisen testivuotia käytetään mitoittavana vaipparakenteissa, joissa ulkoilman suhteellinen kosteus vaikuttaa merkittävästi rakenteen toimintaan. (RIL 255-1-2014.)

Testivuodet huomioivat rakennusfysiikan kannalta kaikki keskeiset olosuhdetekijät. Suunnittelussa on kuitenkin huomioitava, että olosuhteet voivat paikoittain olla hyvinkin erilaiset. Rakennuksen ympärille muodostuva mikroilmasto voi muuttaa todelliset olosuhteet ajoittain kriittisemmiksi kuin mitä laskennassa on käytetty. Mikroilmastoon vaikuttaa muun muassa rakennuksen maantieteellinen sijainti, maaston muodot sekä kasvillisuus. Mahdolliset ilmastolliset poikkeamat on otettava huomioon suunnittelussa ja tulosten tulkinnassa. (RIL 255-1-2014; TTY Tutkimusraportti 159 2013.)

5.4.2 Sisäilman olosuhteet

Keskeiset sisäilman olosuhdetekijät rakennusfysikaalisen laskentatarkastelun osalta ovat sisäilman vesihöyrypitoisuus tai kosteuslisä ulkoilmaan nähden, sisäilman lämpötila sekä paine-erot ulko- ja sisäilman välillä (RIL 255-1-2014).

Rakennuksen käytöstä aiheutuu lähes aina sisäilmaan lisäkosteutta. Lisäkosteus synnyttää vesihöyrypitoisuus eron sisä- ja ulkoilman välille. Sisäilman kosteuslisä

kertoo, kuinka paljon suurempi on sisäilman vesihöyrypitoisuus verrattuna ulkoilmaan. Kosteuslisän suuruus on riippuvainen muun muassa rakennuksen käyttötarkoituksesta, esimerkiksi uimahallin kosteuslisä on huomattavasti suurempi kuin asumiseen tarkoitettujen rakennuksen. Sisäilman kosteuslisät on esitetty taulukossa 2. Lisäksi kuvassa 1 on esitetty sisäilmankosteuslisät lämpötilan funktiona. (RIL 255-1-2014.)

Kuvasta 1 voidaan havaita, että kosteuslisän mitoitusarvona voidaan lämpiminä vuodenaikoina käyttää pienempää arvoa kuin talvisin. Sisäpuolelta tuleva kosteuskuorma on lämpiminä aikoina siis alhaisempi kuin talvisin.

Kosteusluokka	Kosteuslisän mitoitusarvo talvella ($T \leq 5\text{ °C}$)	Rakennustyyppi ^{3,4}
1	$> 5\text{ g/m}^3$ ¹	Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitettut tilat
2	5 g/m^3	Asuinrakennukset, toimisto- ja liikerakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat ^{5,6} , kylmä- ja pakkashuoneet ^{5,6} , talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
3	3 g/m^3 ²	Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat, tekniset tilat, väliaikaiset ja siirrettävät rakennukset

¹ Kosteusluokan 1 rakennuskohteissa sisäilman kosteuslisä ja lämpötila on aina arvioitava kohdekohtaisesti erikseen mitoituksen yhteydessä. Kosteuslisä voi vaihdella rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen välillä $6\text{--}20\text{ g/m}^3$.

² Kosteusluokan 3 rakennuskohteissa kosteustekninen mitoitus tehdään käyttäen talvella kosteuslisän arvoa 3 g/m^3 , ellei voida luotettavasti osoittaa, että pienempikin kosteuslisä riittää tarkasteltavassa kohteessa.

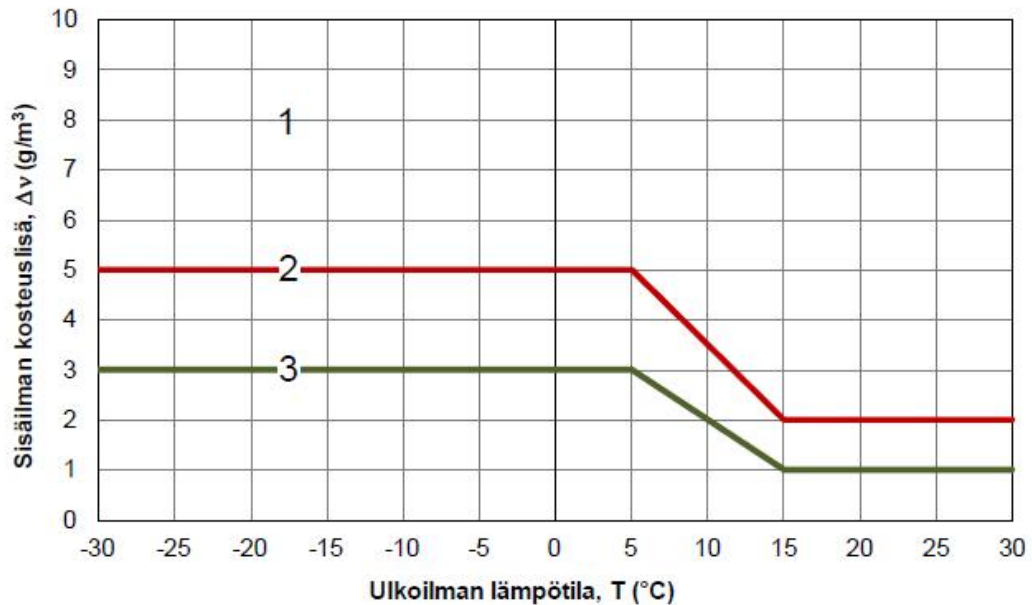
³ Eri rakennustyyppihin kuuluvia rakennuksia on lueteltu tarkemmin RakMK D3:ssa (2012).

⁴ Rakennusta suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon, että rakennuksen käyttötarkoitusta saatetaan joskus myöhemmin muuttaa, jolloin myös sen kosteusluokka voi muuttua.

⁵ Jäähdytettävien tilojen kosteusluokkaa valittaessa on otettava huomioon, että sisäilman kosteuslisä voi nousta suureksi sisätilan mahdollisten lämpötilamuutosten yhteydessä. Jäähallit ja muut jäähdytetyt liikuntatilat, joiden lämpötila nostetaan ajoittain korkeaksi ja joita käytetään ajoittain kosteusluokan 1 mukaisissa tarkoituksissa, kuuluvat kosteusluokkaan 1.

⁶ Jäähdytettävien tilojen vaipparakenteiden mitoituksessa on otettava huomioon myös ulkoa sisälle päin siirtyvä vesihöyry, joka voi aiheuttaa kosteuden kondensoitumista ja homeen kasvulle otollisia olosuhteita lähellä rakenteen sisäpintaa.

Taulukko 2. Sisäilman kosteuslisät (RIL 107-2012)



Kuva 1. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona (RIL 107-2012)

Kun rakennuksen sisäilman lämpötila pyritään pitämään normaalin huonelämpötilan tasolla, laskelmissa suositellaan käytettävän sisäilman lämpötilaa 21°C ympäri vuoden. Muissa rakennuksissa sisäilman lämpötila on suunniteltava tapauskohtaisesti. (RIL 255-1-2014.)

Vaipparakenteen yli vaikuttavat paine-erot ovat merkittävässä osassa tarkasteltaessa ilmavirtauksien vaikutusta rakenteen toimintaan (RIL 255-1-2014).

5.4.3 Materiaaliominaisuudet

Rakenteen eri kerrosten materiaaliominaisuuksien tunteminen on tärkeää, jotta laskentatulos kuvaa riittävällä tarkkuudella rakenteen todellista toimintaa. Rakennusfysiikan kannalta materiaalien tärkeimpiä ominaisuuksia ovat materiaalin ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus, ilmanläpäisevyys, pinnan säteilyominaisuudet, tasapainokosteus sekä materiaalien vesihöyrynvastus. (RIL 255-1-2014.)

Osa materiaaliominaisuuksista on riippuvaisia vallitsevista olosuhteista. Tällaisia ominaisuuksia ovat muun muassa vesihöyrynvastus sekä lämmönjohtavuus. Materiaalin vesihöyrynvastukseen vaikuttaa lämpötila sekä suhteellinen kosteus. (RIL 107-2012.)

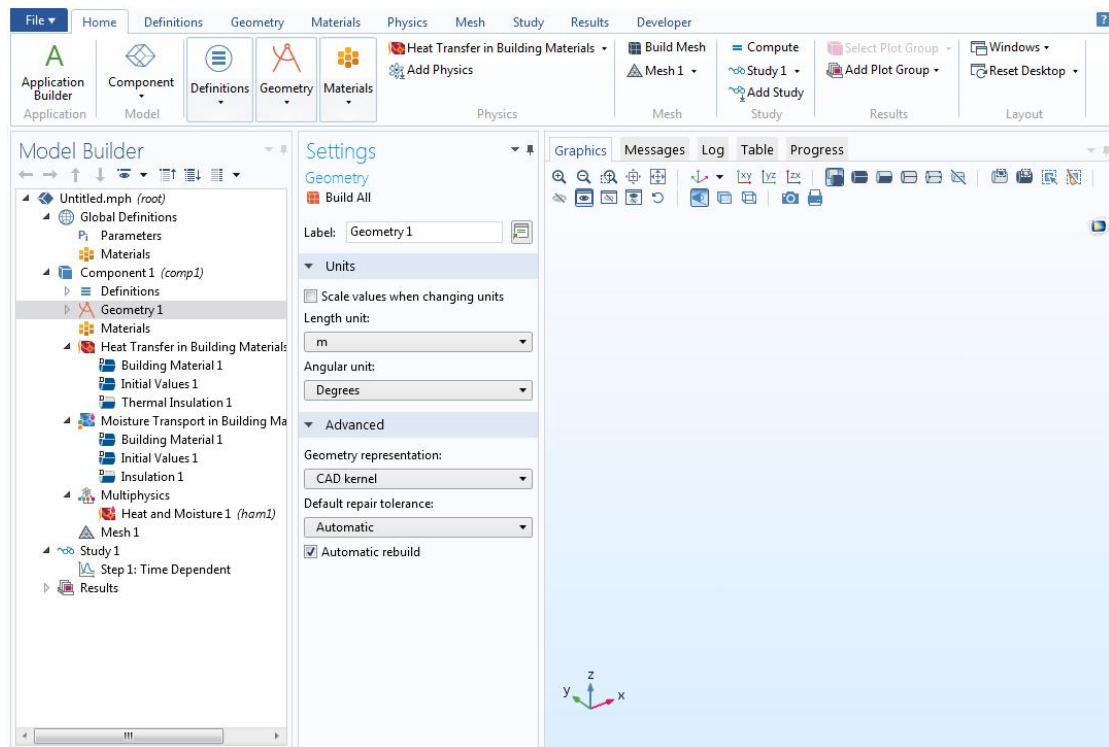
6 Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tarkastelu Cmsol Multiphysics -ohjelmistolla

Rakenteiden rakennusfysikaalinen suunnittelu vaatii tekijältä ammattitaitoa ja ymmärrystä rakenteiden toiminnasta. Rakennusfysiikka on laaja ja moniosainen kokonaisuus, joka on riippuvainen useista eri tekijöistä. Suunnittelun apuna käytetään laskennallistatarkastelua.

Tässä työssä laskenta suoritetaan käyttäen Cmsol Multiphysics 5.3a-ohjelmistoa, joka on tarkoitettu monifysikaalisten ongelmien ratkaisuun. Työssä tarkastellaan tuulettuvaa kevytrakenteista ulkoseinää, jonka rankarakenteena toimii termoranka. Lisäksi suoritetaan esimerkkilaskelma käyttäen sekä Cmsol Multiphysics -ohjelmistoa että käsinlaskentaa. Esimerkkilaskelman tarkoituksena on verrata eri menetelmillä laskettuja tuloksia keskenään, jotta voidaan uskottavasti todeta tulosten oikeellisuus termorankaseinää mallinnettaessa.

6.1 Cmsol Multiphysics -ohjelmisto

Cmsol Multiphysics on Cmsol-konsernin valmistama simulointi- ja mallinnusohjelmisto monifysikaalisiin mallinnusprosesseihin. Ohjelmisto on käytössä useilla eri tekniikanaloilla. Cmsol-ohjelmiston käyttöön ja toimintaperiaatteisiin liittyvää tietoa löytyy Cmsolin-kotisivuilta. Ohjelmiston käyttöliittymä on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Comsol Multiphysics -ohjelmiston käyttöliittymä

Comsol Multiphysics on monipuolinen elementtimenetelmään (Finite Element Method) perustuva numeerinen laskentaohjelmisto, jonka laskenta perustuu osittaisdifferentiaaliyhtälöiden (PDE) ratkaisemiseen. Ohjelmisto soveltuu useiden erilaisten fysiikanilmiöiden simulointiin sekä mallinnukseen. Comsol Multiphysics -ohjelmisto soveltuu käyttöön muun muassa seuraavilla tekniikan osa-alueilla:

- rakenteiden mekaniikka
- virtaustekniikka
- kemiantekniikka
- akustiikka
- lämmön- ja kosteudensiirto.

Tässä työssä perehdytään tarkemmin lämmön- ja kosteudensiirto-osion käyttöön. Lisäksi syvennytään virtaustekniikkaan, jotta tuuletusvälien ilmavirtaukset saadaan mallinnettua.

Laskenta- ja mallinnusprosessi koostuu geometrian luomisesta, materiaaliominaisuuksien määrittämisestä, käytettävien moduulien lisäämisestä sekä elementtiverkon tekemisestä. Tämän jälkeen määritetään ratkaisuperusteet sekä saadaan laskentatulokset.

Mallinnusprosessin alussa valitaan käytettävä avaruusulottuvuus. Vaihtoehtoja ovat muun muassa 3D, 2D ja 1D. Tarkasteltavasta rakenteesta laaditaan geometrinen malli, jolle määritetään materiaaliominaisuudet. Comsol Multiphysics -ohjelmistossa on itsessään sisäänrakennettu materiaalikirjasto, josta on mahdollista valita useita eri materiaaleja. Määritettävät materiaaliominaisuudet vaihtelevat sen mukaan, mitä fysiikanilmiöitä ollaan tarkastelemassa. Malliin voidaan tarpeen mukaan määrittää myös ulkoisia olosuhdetekijöitä, mikäli niiden käyttö on oleellista laskennan kannalta. Tällaisia ominaisuuksia ovat muun muassa lämpötila, tuulennopeus ja suunta sekä auringonsäteilyn määrä.

Geometrian ja materiaaliominaisuuksien määrittämisen jälkeen malliin tehdään elementtiverkko. Verkko jakaa tarkasteltavan geometrian pienempiin osiin eli elementteihin. Elementit yhdistyvät toisiinsa solmupisteiden avulla, joiden pohjalta laskentamallin ratkaisu tapahtuu. Mitä tiheämpi elementtiverkko on, sitä tarkempia tuloksia mallista saa. Erityisesti materiaalien rajapinnoissa kannattaa käyttää mahdollisimman tiheää verkkoa, koska näissä kohdissa tapahtuu rakenteen toiminnan kannalta keskeisiä muutoksia.

Kun elementtiverkko on määritetty, mallin ratkaisu voidaan aloittaa. Ratkaisu-osiossa määritetään ratkaisuperusteet ja laskennan tarkkuustaso. Laskennassa voidaan käyttää muun muassa ajasta riippuvaa ratkaisuperustetta tai vaihtoehtoisesti laskenta voidaan suorittaa stationääri- eli jatkuvuustilassa. Esimerkiksi jos laskennassa käytetään ajasta riippuvaa tarkastelua, tulee tässä kohtaa määrittää tarkasteluajanjakson pituus sekä tarkasteluvälit. Lisäksi määritetään, mitä tuloksia mallista halutaan saada ulos.

Malli voidaan nyt ratkaista. Jos laskennassa tarkastellaan useita eri fysiikan ilmiöitä kerrallaan, voi laskenta kestää pitkäänkin, jopa useita päiviä. Laskennasta saadaan niin visuaalisia kuin numeerisiakin tuloksia. Kun tulokset saadaan mallista ulos, aloitetaan niiden analysointi sekä oikeellisuuden varmistaminen.

6.1.1 Lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan mallinnusprosessi

Lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa tarkasteltaessa mallinnusprosessin pohjana käytetään lämmön- ja kosteudensiirtomoduulia (Heat and Moisture Transport). Kyseisestä moduulista on lisäksi valittavissa alavalikko ”rakennus materiaalit” (Building Materials), joka on tarkoitettu rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tarkasteluun. Käytettävä moduuli määrittää laskennassa tarkasteltavat fysiikat sekä sen, mitä lähtötietoja laskenta vaatii.

Laskettaessa lämmön- ja kosteuden siirtymistä rakenteessa, oleellisia lähtötietoja ovat ulko- ja sisäilman olosuhteet sekä materiaaliominaisuudet. Comsol Multiphysics- ohjelmistossa kyseiset lähtötiedot saadaan kattavasti laskentaan mukaan. Laskentaan voidaan määrittää seuraavat materiaaliominaisuudet:

ρ	tiheys [kg/m ³]
C_p	ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]
k	lämmönjohtavuus [W/(mK)]
w_c	kosteuspitoisuus [kg/m ³]
D_w	diffuusiokerroin [m ² /s]
δ_p	vesihöyrynläpäisevyys [kg/(msPa)]

Ohjelmisto ratkaisee osan ominaisuuksista numeerisesti erinäisten yhtälöiden avulla, jolloin olosuhteiden vaikutukset saadaan materiaaliominaisuuksiin mukaan. Osa ominaisuuksista taas syötetään manuaalisesti. Kuitenkin myös ohjelmiston ratkaisemiin materiaaliominaisuuksiin on mahdollista vaikuttaa, mikäli oma laskenta sitä vaatii.

Lisäksi laskentamalliin syötetään lämpö- ja kosteus teknisen toiminnan kannalta oleelliset olosuhdetekijät. Olosuhdetekijät voivat olla joko vakioarvoja tai ne voivat muuttua ajan mukaan. Ohjelmistosta on mahdollista hakea eri paikkakuntien sääolosuhteita reaaliaikaisten säätietojen pohjalta, olosuhdetekijät voidaan kuitenkin myös määrittää itse. Tässä työssä laskenta suoritetaan käyttäen ajasta riippuvaa ratkaisuperiaatetta. Laskentamalliin määritetään muun muassa ulko- ja

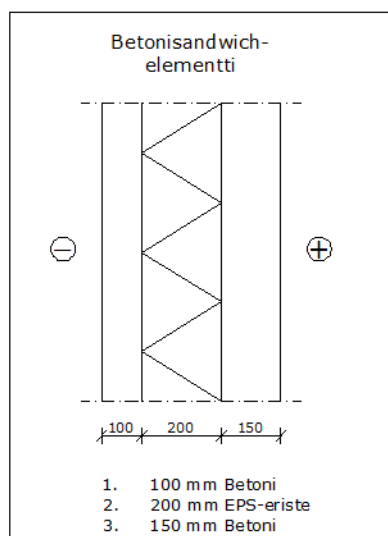
sisäilman lämpötilat sekä suhteelliset kosteudet. Olosuhdetekijöiden lisäksi rakenteen ulko- ja sisäpinnoille määritetään pintavastukset. Sisä- sekä ulkopinnan pintavastukset syötetään ohjelmistoon niiden käänteislukuina. Tämän jälkeen malliin luodaan halutunlainen elementtiverkko ja malli voidaan ratkaista.

6.2 Vertailulaskelmat

Tuulettuvan kevytrakenteisen ulkoseinän lisäksi tässä työssä tarkastellaan myös tuulettumattoman betonisandwich-elementin lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa sekä selvitetään tiiliverhotun ulkoseinän tuuletusvälissä tapahtuvia ilmavirtauksia ja niiden suuruuksia. Näiden tarkastelujen tavoitteena on verrata Comsol Multiphysics -ohjelmistosta sekä käsinlaskennasta saatuja tuloksia keskenään. Laskennoista saatujen tulosten pohjalta voidaan todeta tulosten oikeellisuus sekä laskennan mahdolliset ongelmakohdat.

6.2.1 Lämmön- ja kosteudensiirron laskeminen

Tässä laskennassa selvitetään tuulettumattoman betonisandwich-elementin lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Laskenta suoritetaan käyttäen Comsol Multiphysics -ohjelmistoa sekä käsinlaskentaa. Esimerkkirakenne pyritään pitämään mahdollisimman yksinkertaisena laskennan helpottamiseksi. Tämä ei kuitenkaan vaikuta tulosten vertailukelpoisuuteen. Laskennassa ei ole esimerkiksi huomioitu kiinnikkeistä aiheutuvia pistemäisiä kylmäsiltoja. Esimerkkirakenne on esitetty kuvassa 3. Elementin rakennekerrokset on esitetty ulkoa sisälle päin.



Kuva 3. Betonisandwich-elementti

Laskenta keskittyy selvittämään rakenteen lämpötilajakauman sekä eri materiaalien kosteuspitoisuudet. Lisäksi ratkaistaan rakenteen U-arvo. Laskenta suoritetaan käyttäen mielivaltaisesti määritettyjä olosuhdetekijöitä, jotka kuitenkin suuruudeltaan voisivat vastata todellisia tilanteita. Sisäilman lämpötilaksi valitaan $T_i = 21\text{ °C}$ ja suhteelliseksi kosteudeksi $RH_i = 40\%$. Ulkoilman vastaavat laskennassa käytettävät arvot ovat $T_e = 0\text{ °C}$ ja $RH_e = 75\%$. Laskenta suoritetaan jatkuvuustilassa eli vakio-olosuhteissa. Vesihöyrynvastukset on määritetty 100 mm paksuiselle rakennekerrokselle, joten ne muutetaan vastaamaan esimerkki rakenteen kerrospaksuuksia. Muutokset on esitetty laskelman yhteydessä (Liite 1).

Betoni:	Lämmönjohtavuus	$\lambda = 1,7\text{ W/mK}$
	Vesihöyrynvastus	$Z_p = 50 \times 10^9\text{ m}^2\text{sPa/kg}$
EPS-eriste:	Lämmönjohtavuus	$\lambda = 0,036\text{ W/mK}$
	Vesihöyrynvastus	$Z_p = 25 \times 10^9\text{ m}^2\text{sPa/kg}$

Rakenteen rakennusfysikaalista ratkaisua varten täytyy myös määrittää rakenteen pintavastukset. Pintavastukset on esitetty taulukossa 3. Seinärakenteessa ulkopuolisena pintavastuksena käytetään arvoa $R_{se} = 0,04\text{ m}^2\text{K/W}$ ja sisäpuolisena $R_{si} = 0,13\text{ m}^2\text{K/W}$.

Pintavastus [$\text{m}^2\text{K/W}$]	Lämpövirran suunta		
	ylöspäin	vaakasuoraan	alaspäin
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

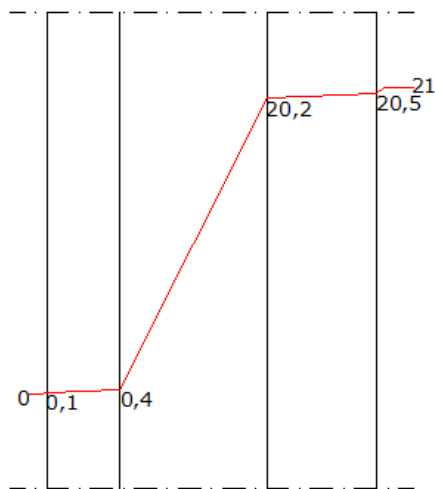
Taulukko 3. Pintavastukset (SFS-EN ISO 6946:2017)

Käsinlaskenta eli analyyttinen ratkaisu

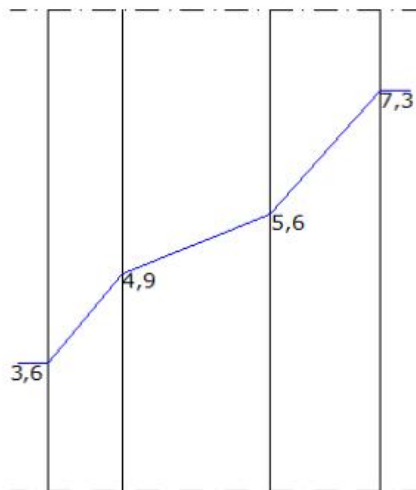
Käsinlaskennan avulla voidaan määrittää analyyttisesti rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa kuvaavia suureita. Tarkastelua varten Microsoft Exceliin luotiin laskenta-alusta, jolla analyyttinen ratkaisu toteutettiin. Laskenta-alusta noudattaa käsinlaskennan periaatteita. Tässä laskentaosiossa selvitetään läm-

mön- ja kosteuden siirtymistä rakenteen läpi. Valittujen lähtöarvojen pohjalta voidaan ratkaista rakenteen lämpötilajakauma sekä rakenteen eri kerroksien kosteuspitoisuudet. Lisäksi selvitetään rakenteen lämmönläpäisykerroin eli U-arvo.

Rakenteen U-arvoksi saadaan $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, joka täyttää myös ulkoseinärakenteille asetetun lämmönläpäisykertoimen vertailuarvo vaatimuksen. Rakenteen lämpötilajakauma on esitetty kuvassa 4 ja eri kerrosten kosteuspitoisuudet kuvassa 5.



Kuva 4. Sandwich-elementin lämpötilajakauma, analyttinen ratkaisu [°C]



Kuva 5. Sandwich-elementin kosteuspitoisuudet, analyttinen ratkaisu [g/m³]

Analyttinen ratkaisumalli perustuu yksittäisten funktioiden määrittämiseen ja tätä kautta halutun ratkaisun löytämiseen. Rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa tarkasteltaessa määritetään seuraavat suureet ja arvot:

d materiaalikerroksen paksuus [m]
 λ materiaalin lämmönjohtavuus [W/(mK)]

R_i materiaalin lämmönvastus [m²K/W]

$$R_i = \frac{d}{\lambda} \quad (1)$$

R_{si} sisäpinnan pintavastus [m²K/W]

R_{se} ulkopinnan pintavastus [m²K/W]

R_T kokonaislämmönvastus [m²K/W]

$$R_T = R_{si} + \sum R_i + R_{se} \quad (2)$$

U lämmönläpäisykerroin [W/(m²K)]

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (3)$$

ΔT lämpötilanmuutos [°C]

T lämpötila [°C]

P_{vk} ilman kyllästysosapaine [Pa]

Z_{pi} materiaalin vesihöyrynvastus [m²sPa/kg]

ΔP_{vi} vesihöyrynosapaineen muutos [Pa]

P_{vi} vesihöyrynosapaine [Pa]

v_k ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus [g/m³]

v vesihöyrypitoisuus [g/m³]

RH suhteellinen kosteus [%]

Käsinlaskennassa suhteellinen kosteus ratkaistaan vesihöyryn osapaineiden avulla, jonka jälkeen suhteellisen kosteuden avulla voidaan ratkaista rakennekerrosten vesihöyrypitoisuudet. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 4) on esitetty ilman kyllästysvesihöyrypitoisuuksia sekä kyllästysosapaineita eri lämpötiloissa. Tässä työssä ne kuitenkin laskettiin käyttäen kaavoja 4 ja 5:

$$P_{vk} = 101,325 \times 10^3 \times e^{(70,4347 - 7362,7/T + 6,95208 \times 10^{-3} \times T - 9 \times \ln T)} \quad (4)$$

$$v_k = 4,85 + 3,47 \times \left(\frac{t}{10}\right) + 0,954 \times \left(\frac{t}{10}\right)^2 + 0,158 \times \left(\frac{t}{10}\right)^3 + 0,0281 \times \left(\frac{t}{10}\right)^4 \quad (5)$$

Analyttinen laskenta ja laskennassa käytetyt kaavat on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1.

t (°C)	v _k (g/m ³)	p _{vk} (Pa)	t (°C)	v _k (g/m ³)	p _{vk} (Pa)	t (°C)	v _k (g/m ³)	p _{vk} (Pa)	t (°C)	v _k (g/m ³)	p _{vk} (Pa)
-20	0,88	102	1	5,21	658	22	19,40	2640	43	59,41	8663
-19	0,95	111	2	5,58	708	23	20,54	2805	44	62,40	9128
-18	1,04	122	3	5,98	762	24	21,74	2979	45	65,52	9614
-17	1,14	135	4	6,40	818	25	23,00	3162	46	68,77	10122
-16	1,25	149	5	6,84	878	26	24,32	3355	47	72,15	10653
-15	1,38	164	6	7,31	941	27	25,71	3559	48	75,67	11207
-14	1,52	181	7	7,80	1008	28	27,17	3773	49	79,33	11786
-13	1,67	200	8	8,32	1079	29	28,70	3999	50	83,14	12390
-12	1,83	221	9	8,87	1154	30	30,31	4237	51	87,10	13020
-11	2,01	243	10	9,45	1234	31	31,99	4487	52	91,21	13677
-10	2,20	266	11	10,06	1318	32	33,75	4750	53	95,48	14362
-9	2,40	292	12	10,71	1408	33	35,60	5027	54	99,92	15075
-8	2,61	319	13	11,39	1502	34	37,54	5317	55	104,52	15818
-7	2,84	348	14	12,10	1603	35	39,56	5622	56	109,30	16592
-6	3,08	379	15	12,86	1708	36	41,68	5943	57	114,25	17397
-5	3,33	412	16	13,65	1820	37	43,90	6279	58	119,39	18234
-4	3,60	447	17	14,49	1939	38	46,21	6631	59	124,72	19105
-3	3,89	485	18	15,37	2064	39	48,63	7001	60	130,24	20010
-2	4,19	524	19	16,30	2197	40	51,16	7388	61	135,95	20951
-1	4,51	566	20	17,28	2337	41	53,79	7793	62	141,87	21928
0	4,85	611	21	18,31	2484	42	56,54	8218	63	147,99	22943

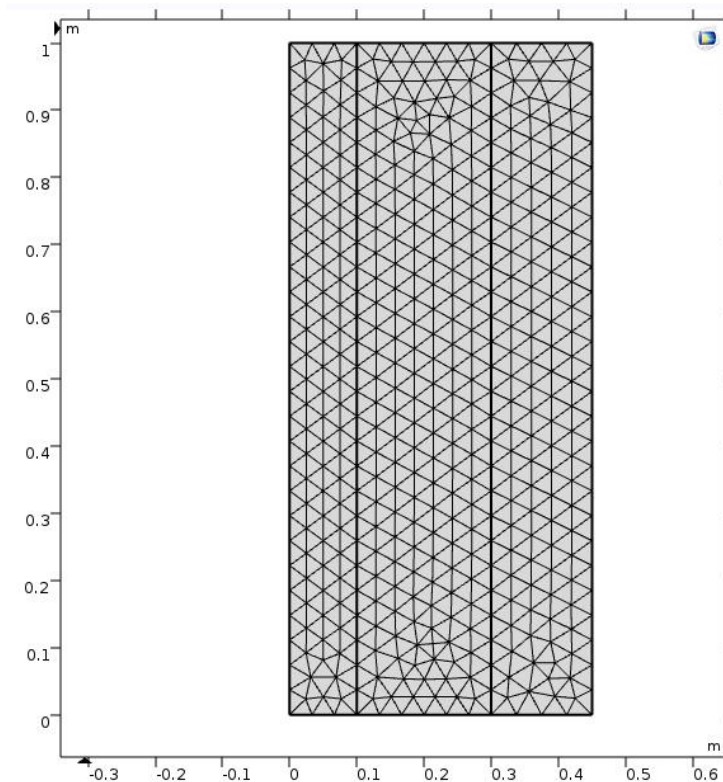
Taulukko 4. Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus ja kyllästysosapaine lämpötilan funktiona (Rafnet-ryhmä 2004)

Numeerinen ratkaisu Comsol Multiphysics -ohjelmistolla

Comsol Multiphysics -ohjelmisto määrittää halutun ratkaisu numeerisin keinoin, ratkaisten osittaisdifferentiaaliyhtälöiden sarjaa. Laskenta perustuu malliin luotuun elementtiverkkoon. Esimerkki rakennetta tutkitaan käyttäen 2D-ulottuvuutta.

Rakenteelle ja sen materiaaleille määritetään samat lähtöarvot kuin analyytissä laskennassakin. Yhdenmukaisilla lähtöarvoilla varmistetaan tulosten vertailukelpoisuus.

Mallin geometrian ja materiaaliominaisuuksien ollessa halutunlaiset voidaan malliin luoda elementtiverkko. Esimerkilaskelmassa käytetään fysiikankontrolloimaa kolmioista koostuvaa elementtiverkkoa (Kuva 6).



Kuva 6. Comsol Multiphysics -ohjelmistolla tehty fysiikan kontrolloima betonielementtiseinän elementtiverkko

Laskennassa käytetään samoja alkuarvoja kuin käsinlaskennassakin. Comsol Multiphysics -ohjelmisto vaatii kuitenkin laskentaan vesihöyrynläpäisevyyden yksikössä $\text{kg}/(\text{msPa})$, joten analyttisessä laskennassa käytetyt vesihöyrynvastukset muutetaan kyseiseen muotoon. Muutokset tapahtuvat kaavoilla 6 ja 7:

$$Z_p = \frac{1}{W_p} \quad (6)$$

Z_p = vesihöyrynvastus [$\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$]

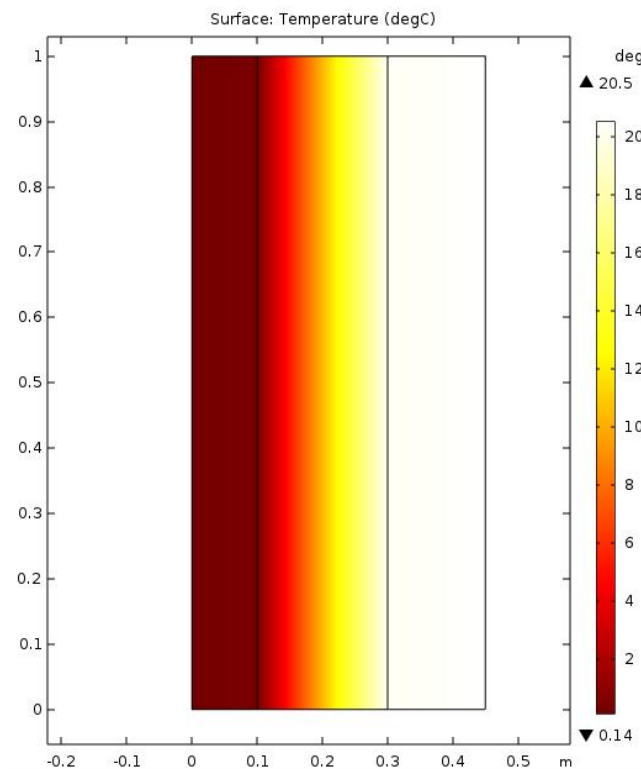
W_p = vesihöyrynläpäisykerroin [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{sPa})$]

$$\delta_p = W_p \times d \quad (7)$$

δ_p = vesihöyrynläpäisevyys [kg/(msPa)]

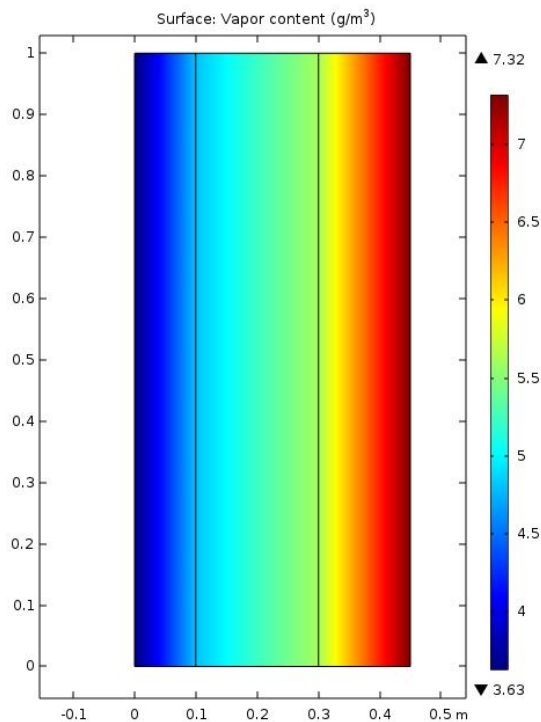
d = kerroksen paksuus [m]

Laskelmasta saatu lämpötilajakauma vastaa analyyttisen ratkaisun tuloksia. Lämpötilajakauma on esitetty kuvassa 7. U-arvon laskenta tapahtuu integroinnin avulla. Ohjelmistossa on mahdollista ratkaista tietyn pinnan läpi tapahtuva normaali lämpövirta. Saatu tulos jaetaan vielä rakenteen yli vallitsevalla lämpötilaerolla, jolloin saadaan tulokseksi rakenteen lämmönläpäisykerroin eli U-arvo. Kuten käsinlaskennassa, myös Comsol Multiphysics -ohjelmistolla tulokseksi saadaan $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.



Kuva 7. Rakenteen lämpötilajakauma ratkaistuna Comsol Multiphysics -ohjelmistolla [°C]

Rakennekerrosten kosteuspitoisuudet vastaavat myös suuruusluokaltaan analyyttisen ratkaisun tuloksia. Rakenteen kosteuspitoisuudet on esitetty kuvassa 8. Laskentaraaportti on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2.



Kuva 8. Rakennekerrosten kosteuspitoisuudet ratkaistuna Comsol Multiphysics -ohjelmistolla [g/m^3]

Tulosten vertailu

Tuloksien pohjalta voidaan todeta, että laskentatulokset vastaavat toisiaan hyvinkin tarkasti. Lämpötekniikan toiminnan kannalta ei ole havaittavissa minkäänlaisia poikkeamia. Laskentatavasta riippumatta rakenteen läpi tapahtuvat lämpövirrat ovat suuruudeltaan samoja.

Kosteustekniikan toiminnan osalta on havaittavissa pieniä eroja rakenteen toiminnassa. Analyttinen ratkaisu antaa rakenteelle hieman suuremmat kosteuspitoisuudet kuin numeerinen ratkaisu. Erot laskentatuloksissa johtuvat todennäköisesti siitä, että Comsol käyttää ratkaisussaan myös muita materiaaliominaisuuksia kuin mitä analyttisessä ratkaisussa käytetään. Erot eivät kuitenkaan ole merkittäviä.

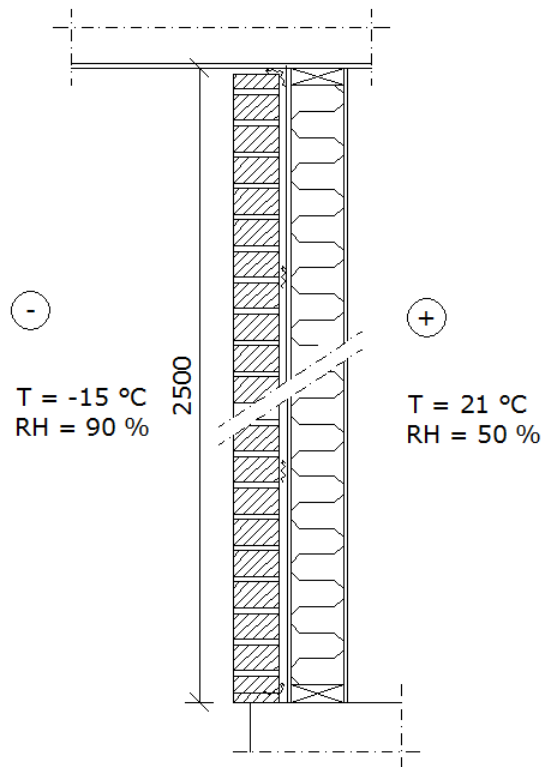
Comsol Multiphysics -ohjelmistolla saatuja tuloksia voidaan vertailulaskelman pohjalta pitää luotettavina ja oikeellisinä. Kuitenkin tuloksien analysoinnissa on oltava kriittinen ja pohdittava sitä, vastaavatko ne todellista tilannetta ja millaisia ongelmia todellisissa rakenteissa voi olla. Vertailulaskelmien tulokset on esitetty taulukossa 5.

	Analyyttinen ratkaisu	Numeerinen ratkaisu, Cmsol Multiphysics
U-arvo [W/(m ² K)]	0,17	0,17
Lämpötilajakauma [°C]		
• ulkopinta	0,14	0,14
• ulkokuori-EPS	0,35	0,35
• EPS-sisäkuori	20,22	20,20
• sisäpinta	20,54	20,5
Kosteuspitoisuus [g/m ³]		
• ulkopinta	3,64	3,63
• ulkokuori-EPS	4,85	4,80
• EPS-sisäkuori	5,65	5,62
• sisäpinta	7,33	7,32
RH _{max}	98 %	97 %

Taulukko 5. Sandwich-elementin vertailulaskelmien tulokset

6.2.2 Virtauslaskenta

Cmsol Multiphysics -ohjelmiston virtauslaskennan toimivuutta arvioitiin ratkaistamalla tiiliverhotun ulkoseinän tuuletusvälissä tapahtuvia ilmavirtauksia. Tässä tarkastelussa käsinlaskentaa ei suoritettu itse, vaan Cmsol Multiphysics -ohjelmistolla ratkaistuja tuloksia verrattiin *Opetusmonisteet S-92* (livonen) esimerkkilaskelmaan (s.67). Kyseisessä esimerkissä tuuletusvälin ilmavirtaukset on ratkaistu käyttäen käsinlaskennan periaatteita. Rakenne ja laskennassa käytetyt lähtöarvot on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Tuulettuva ulkoseinärakenne ja laskennan lähtöarvot

Seinärakenteen rakennekerrokset ulkoa sisäänpäin ovat:

130 mm	Tiiliverhous
25 mm	Tuuletusrako
12 mm	Tuulensuojalevy
150 mm	Mineraalivilla+ puurunko k600
12 mm	Lastulevy

Laskennassa keskitytään selvittämään ainoastaan tuuletusvälissä tapahtuvia il-mavirtauksia. Laskenta suoritetaan käyttäen lämmön- ja kosteudensiirtomoduulia sekä virtauslaskentaa. Seinän alaosassa on virtauskanava, josta ilmaa siirtyy tuuletusväliin, kanavan halkaisija on 2 mm. Seinän yläosassa puolestaan on ulos-virtauskanava, jonka halkaisija on 20 mm. Käytetyt arvot pohjautuvat analyyytti- sessä ratkaisussa käytettyihin arvoihin (Iivonen).

Laskentaan syötetään lähteen mukaiset materiaaliominaisuudet sekä olosuhde- tekijät. Lisäksi tuuletusvälin sisään- ja ulosvirtauskanavien välille asetetaan

paine-ero 0,512 Pa, joka lähteessä on ratkaistu. Ilmavirtaukset lähtevät liikkeelle lämpötilaerojen aiheuttaman paine-eron vaikutuksesta eli tässä tapauksessa ilmavirtauksia aiheuttaa ainoastaan luonnollinen konvektio.

Käsinlaskennassa ulkoilman on oletettu lämpenevän -11 °C:een siirryttäessä ulkoa tuuletusväliin. Tämän seurauksena myös ilman suhteellinen kosteus alenee. Näillä tiedoilla tuuletusvälin suhteellisen kosteuden laskettiin olevan 62 %. Tämä syötetään lähtötiedoksi Comsol-laskentaan.

Numeerisessa laskennassa käytetään siis samoja lähtöarvoja kuin analyyttisessä ratkaisussa. Lisäksi laskentaan syötetään lähtötiedoiksi myös muutamia analyyttisessä ratkaisussa ratkaistuja suureita, jotta laskenta saadaan toimimaan.

Mallin ratkaisu tapahtuu jatkuvuustilassa ja ratkaisussa keskitytään tuuletusväli ilman virtausnopeuden selvittämiseen. Analyyttisessä ratkaisussa keskimääräiseksi virtausnopeudeksi on saatu 0,006 m/s.

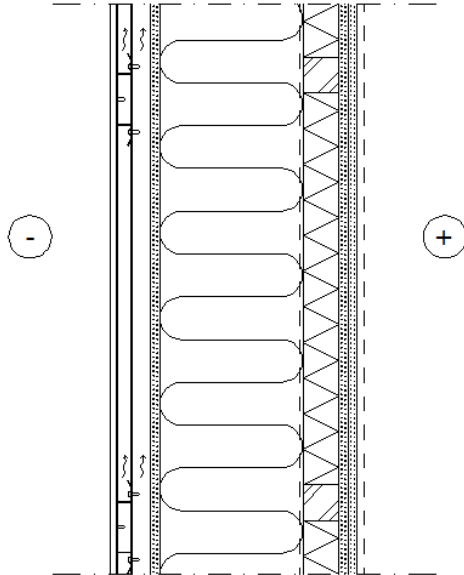
Comsol Multiphysics -ohjelmistolla ratkaisua varten tuuletusväliin määritetään tarkastelupisteitä erikohtiin. Tarkastelut tehdään puolessavälissä seinärakennetta eli korkeudella 1250 mm. Tarkastelupisteet määritetään tuuletusvälin keskellä sekä reuna-alueilla, näin saadaan kokonaiskuva ilmavirtauksen nopeudesta. Tulosten pohjalta voidaan määrittää keskimääräinen virtausnopeus.

Virtausnopeudeksi tuuletusvälin keskikohdassa saadaan 0,0075 m/s ja reuna-alueilla 0,0047 m/s. Näiden tulosten pohjalta saadaan keskimääräiseksi virtausnopeudeksi 0,006 m/s. Tulokset vastaavat näin ollen analyyttisen ratkaisun tuloksia ja niitä voidaan pitää oikeellisina. Laskentaraaportti on esitetty liitteessä 3.

6.3 Kevytrakenteinen ulkoseinä

Comsol Multiphysics -ohjelmistolla suoritettava rakennusfysikaalinen laskentatarkastelu keskittyy tuulettuvan kevytrakenteisen ulkoseinän kosteusteknisen toiminnan selvittämiseen. Tarkoituksena on verrata kahden samantyyppisen rakenteen toimintaa toisiinsa. Tässä työssä kevytrakenteisella ulkoseinällä tarkoitetaan termorankaseinää. Tarkasteltavat rakenteet on esitetty kuvissa 10 ja 11.

Termorangalla tarkoitetaan rei'itettyä teräsorsirakennetta, joka on nykyisin hyvin yleisesti käytössä. Rei'ityksen ansiosta eristekerroksessa sijaitseva rankarakenne, ei merkittävästi heikennä rakenteen U-arvoa. (Ruukki 2018)



Kuva 10. Termorankaseinä 1

Seinärakenteen rakennekerrokset ulkoa sisäänpäin ovat:

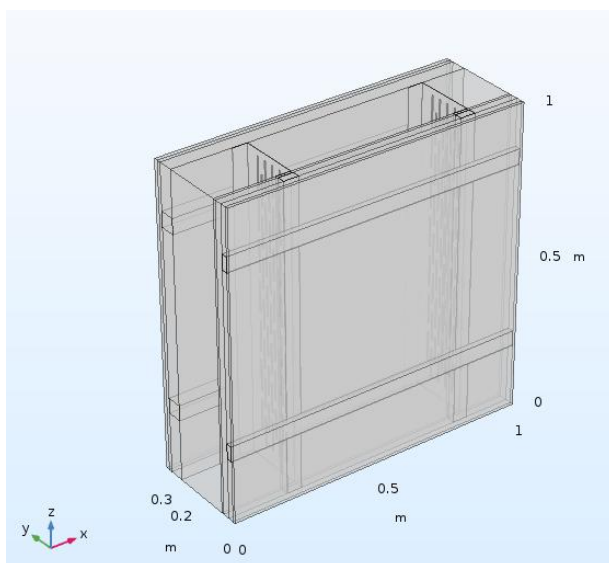
- Ulkoverhous
- 20 mm Vaakaorret, tuuletusväli
- Sadetakkipelti
- 25 mm Pystykoolaus k600
- 9 mm Tuulensuojalevy
- 200 mm Termoranka + mineraalivilla
- 0,2 mm Höyrynsulkumuovi
- 50 mm Vaakakoolaus + mineraalivilla
- 13 mm Kipsilevy
- 13 mm Erikoiskova kipsilevy

Kuvasta 11 voidaan havaita, ettei toisessa seinärakenteessa ole käytetty sade-takkipeltiä. Muilta osin rakenne vastaa ensimmäistä seinärakennetta. Työssä selvitetään sadetakkipellin sekä tästä aiheutuvan kaksinkertaisen tuuletusvälin vaikutusta rakenteen toimintaan.

6.3.1 Laskennan kulku

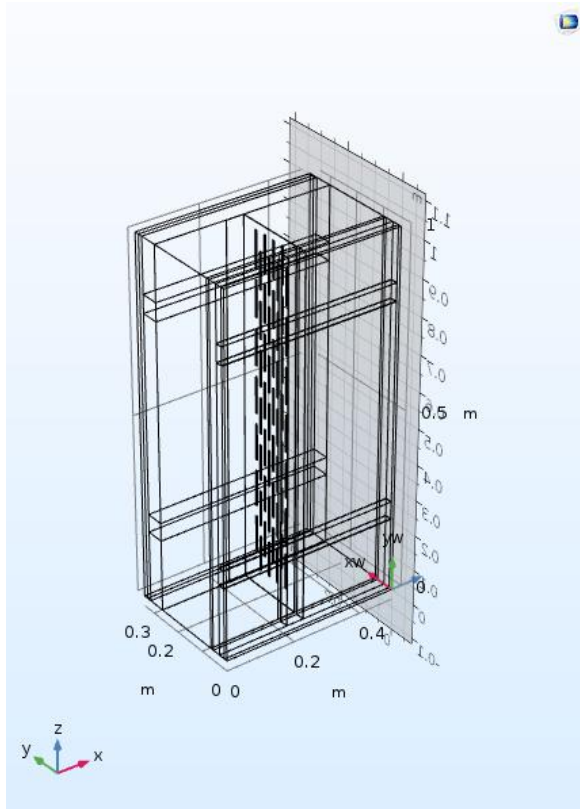
Laskennan tarkoituksena on selvittää rakenteiden kosteusteknistä toimintaa valituissa sääolosuhteissa. Laskennan pääpaino on rakenteen kosteusteknisen toiminnan selvittämisessä, mutta laskennassa tarkastellaan myös rakenteen lämpöteknistä toimintaa. Lämmönsiirtyminen rakenteen sisällä vaikuttaa myös kosteustekniseen toimintaan. Simulointi- ja mallinnusprosessin pohjana käytetäänkin lämmön- ja kosteudensiirtomodulia. Lisäksi laskentaan otetaan mukaan myös virtaustekniikka, jonka avulla tuuletusvälissä tapahtuvat ilmavirtaukset ja niiden vaikutukset saadaan mukaan laskentaan.

Rakenteen mallinnusprosessi suoritetaan 3D-tilassa. 3D-ulottuvuuden käyttö mahdollistaa rinnakkaisten rakennekerrosten oikeaoppisen mallinnuksen. Tätä kautta myös laskentatulokset saadaan tarkemmiksi ja todellisuutta vastaaviksi. Comsol Multiphysics -ohjelmistolla luotu geometrinen laskentamalli on esitetty kuvassa 12. Kuvasta voidaan havaita rakenteen useat eri kerrokset. Geometrian luominen vaati tarkkuutta sekä suhteellisen paljon aikaa, koska mallissa on useita pieniä yksityiskohtia.



Kuva 12. Termorankaseinän geometrinen malli Comsol Multiphysicsissä

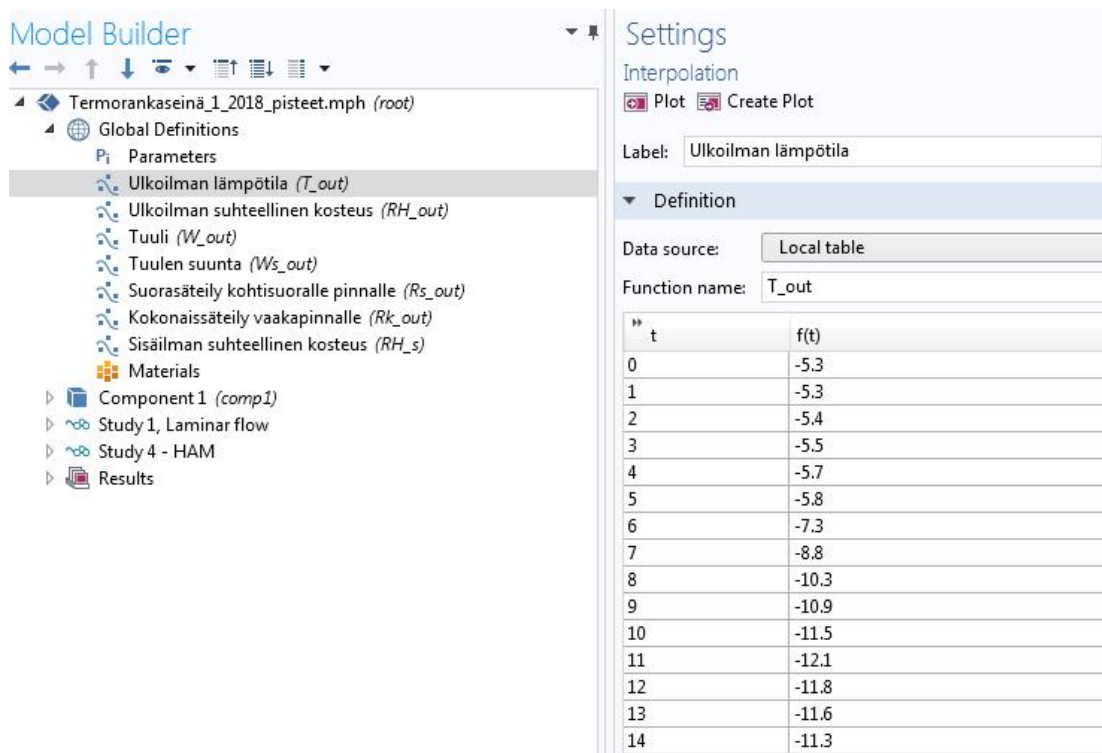
Kuvasta 12 voidaan havaita myös rakenteen symmetrisyys. Symmetrian takia malli puolitetaan laskentaa varten, jotta laskentakustannukset saadaan pienemmään. Geometrisen mallin puolitus tehdään käyttäen Work Plane -työkalua. Puolitettu rakenne on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Laskentaa varten puolitettu seinärakenteen geometrinen malli

Laskentamalliin määritetään seuraavaksi tarvittavat materiaaliominaisuudet. Materiaalit määritetään eri kerroksille vastaamaan kyseisten materiaalien ominaisuuksia. Tässä työssä käytetään Comsol Multiphysics -ohjelmiston oman materiaalikirjaston materiaaleja, joiden ominaisuuksia muokataan tähän laskentaan sopiviksi. Materiaaleille määritettävät ominaisuudet ovat oleellisia juuri lämmön- ja kosteudensiirron kannalta. Suurin osa käytetyistä materiaaliominaisuuksista pysyy laskennassa vakiona. Lisäksi tuuletusvälissä kiertävälle ilmalle määritetään ominaisuuksia, jotka mahdollistavat tuuletusilmavirtausten mallintamisen sekä laskennan. Virtauslaskennan kannalta merkittäviä ominaisuuksia ovat muun muassa tiheys ja dynaaminen viskositeetti.

Seuraavaksi laskentaan asetetaan rakenteen lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan kannalta keskeiset olosuhdetekijät sekä muut tarvittavat reunaehdot. Ulkoilman olosuhteina laskennassa käytetään Jokioisen 2004 ilmastollisia testivuotia. Testivuotien sääaineistot tuodaan Comsol Multiphysics -ohjelmistoon tekstitiedostoina, jotta ne saadaan laskennassa käyttöön. Sääolosuhteet kuvataan ajanfunktioina. Kuvassa 14 on esitetty laskennassa käytetyt olosuhdetekijät (vasemmalla) sekä otos käytetystä ulkolämpötila funktiosta (oikealla).



Kuva 14. Esimerkki Comsol Multiphysics -ohjelmistossa käytetystä funktiosta

Sisäilman olosuhteina käytetään vakioarvoja. Lämpötilana käytetään 21 °C, joka on yleisesti käytössä rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa. Sisäilman kosteuslisäksi valitaan 5 g/m³, joka pysyy vakiona ympäri vuoden. Todellisuudessa kosteuslisän mitoitusarvona käytetään kesäisin pienempää arvoa kuin talvisin. Tältä osin laskentaa yksinkertaistettiin.

Comsol Multiphysics -ohjelmisto vaatii laskentaan suhteellisen kosteuden eikä ilman kosteuspitoisuutta. Sisäilman kosteuspitoisuus ratkaistaan Excelissä ulkoilman suhteellisen kosteuden perusteella. Sisäilman kosteuspitoisuuksien kautta saadaan taas laskettua sisäilman suhteellinen kosteus. Näin laskentaan saadaan

funktio myös sisäilman suhteellisesta kosteudesta. Sisäilman suhteelliselle kosteudelle asetettiin yläraja $RH_i = 85 \%$. Yläraja asetettiin, jotta olosuhteet pysyisivät realistisinä ja vastaisivat todellisia tilanteita. Laskennan kautta saadut, tätä suuremmat arvot, muutettiin vastaamaan tätä rajaa.

Rakenteen ulko- ja sisäpinnoille asetetaan pintavastukset. Pintavastuksina käytetään standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukaisia arvoja (Taulukko 3). Rakenteelle, jossa lämpövirran liike tapahtuu vaakasuunnassa, käytetään sisäpinnan pintavastuksena arvoa $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja ulkopinnan pintavastuksena $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ (SFS-EN ISO 6946:2017). Laskentaan sijoitetaan kyseisiä lukuarvoja vastaavat käänteisluvut.

Lämpötekniikan toiminnan kannalta oleelliset olosuhdetiedot syötetään laskentaan kohdassa Heat Transfer in Building Materials. Ohjelmisto poimii tässä kohdassa lämmönsiirron kannalta oleelliset materiaaliominaisuudet mukaan laskentaan. Valitut olosuhdetekijät syötetään laskentaan mukaan Heat Flux -osiossa. Aiemmin luodusta geometriasta valitaan haluttu rajapinta, jolla kyseiset ominaisuudet syötetään. Tässä tapauksessa olosuhdetekijät syötetään rakenteen ulko- sekä sisäpinnalle.

Malliin asetetaan myös reunaehdoja, jotka mahdollistavat rakenteiden sekä muiden tarkasteltavien osien oikeellisen laskennan. Kuten edellä mainittiin, geometrinen malli puolitettiin laskentakustannusten säästämiseksi. Rakenteen puolituksen takia käytetään symmetria reunaehto (Symmetry). Reunaehto määrittää sen, että rakenne jatkuu vastaavanlaisena valitun rajapinnan yli. Rajapinnaksi valitaan näin ollen rakenteen katkaistu sivu. Laskentamallin muille pinnoille ohjelmisto asettaa reunaehdon Thermal Insulation. Kyseinen ehto määrittää sen, ettei kyseisiltä sivuilta tapahdu lämpövirtaa, vaan rakenteen ajatellaan jatkuvan.

Rakenteen kosteustekniseen toimintaan liittyvät olosuhdetekijät ja reunaehdot määritetään kohdassa Moisture Transport in Building Materials. Kosteudensiirto osion toimintaperiaate on sama kuin lämmönsiirronkin.

Lämmön- ja kosteudensiirron lisäksi tässä työssä tarkastellaan myös tuuletusvälin ilmavirtauksia ja niiden vaikutusta rakenteen toimintaan. Ilmavirtausten mallinnusta varten laskentaan tuodaan uusi fysiikka, Laminar Flow, joka mahdollistaa

virtausten kannalta oleellisten lähtötietojen käytön sekä virtausten huomioon ottamisen laskennassa. Jotta ilmapirtaukset saadaan mukaan myös lämmön- ja kosteudensiirron laskennassa, määritetään myös näihin fysiikoihin tiedot virtausalueesta ja virtaavan ilman ominaisuuksista. Tässä kohtaa ominaisuudet kuitenkin painottuvat virtaavan ilman lämpötilaan sekä kosteuspitoisuuteen. Virtaustekniset asiat määritetään Laminar Flow -osiossa.

Laminar Flow -osiossa määritetään rakennekerrokset, joissa virtausta tapahtuu. Tässä työssä virtausten ajatellaan tapahtuvan ainoastaan tuuletusväleissä. Virtauksille sekä tuuletusvälin olosuhteille asetetaan alkuarvot sekä muut oleelliset lähtötiedot.

Yleisesti ottaen voidaan olettaa, että ilma lämpenee mentäessä tuuletusväliin, ja näin ollen se pystyy sitomaan itseensä enemmän kosteutta ja kuivattamaan rakennetta. Kesäaikaan tuuletusilman lämpenee keskimäärin 10 °C ja talvisin 2 °C ulkoilmaan nähden (TTY Tutkimusraportti 159 2013). Tässä laskennassa käytetään arvoa 2 °C ympärivuoden, koska näin laskennassa ollaan varmallalla puolella.

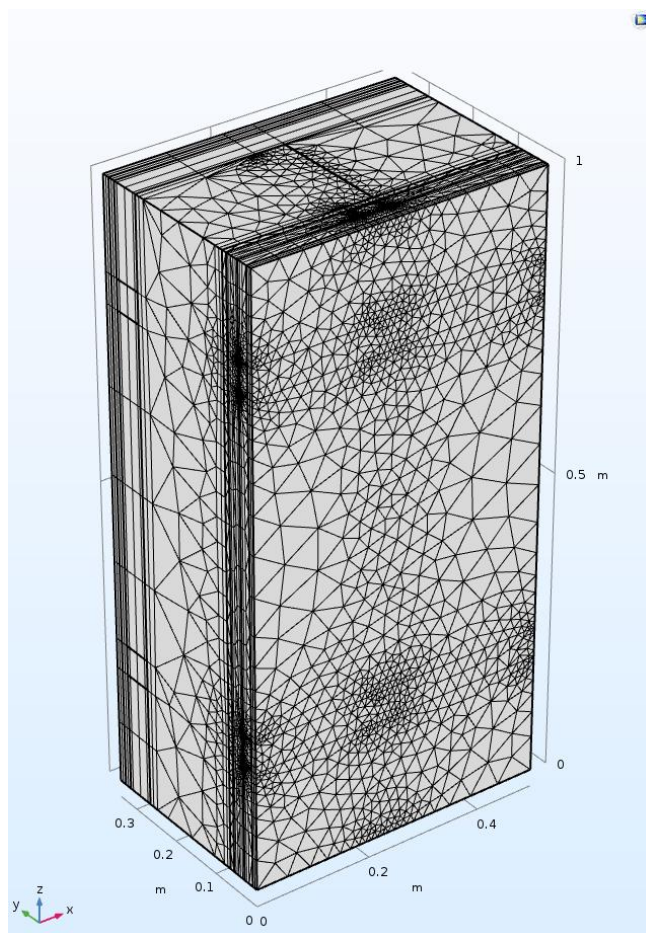
Lämpötilan noustessa ilman suhteellinen kosteus alenee. Suhteellisen kosteuden arvo tuuletusvälissä ratkaistiinkin lämpötila erojen kautta. Testivuosi-aineiston lämpötiladatan pohjalta suoritettiin keskimääräinen laskenta sille, paljonko suhteellinen kosteus alenee muutaman asteen lämpötilan nousussa. Tulokset osoittivat, että suhteellinen kosteus muuttui noin 10–20 %. Laskentaa valittiin vakio arvo 12 %, joka osoittaa, että tuuletusvälin ilmassa on 12 % alhaisempi suhteellinen kosteus kuin ulkoilmassa.

Tuuletusvälin ilman voidaan yleisesti ajatella vaihtuvan noin 0–40 kertaa tunnissa, riippuen muun muassa rakennuksen korkeudesta. (TTY Tutkimusraportti 159). Tässä työssä ilmanvaihtuvuus valittiin perustuen näihin yleisiin tapauksiin. Ilmanvaihtuvuuden kautta saatiin ratkaistua tuuletusvälissä tapahtuvan ilmapirtauksen nopeus, jota laskennassa tarvitaan. Tuuletusvälin ilmapirtaukseksi saadaan 0,02 m/s. Ilmapirtauksen ajatellaan tapahtuvan luonnollisen konvektion vaikutuksesta alhaalta ylöspäin. Ilmapirtauksille määritetään sisään- ja ulosvirtausehdot (Inlet ja Outlet). Sisään virtauskanavaksi valitaan tuuletusvälin alaosa,

jolle asetetaan sisään virtausnopeus 0,02 m/s, joka on sama kuin laskentaan valittu arvo. Ulosvirtaukselle asetettiin paine-ehto 0 Pa.

Elementtiverkko luodaan käyttäen erityyppisiä verkkoja eri materiaalikerroksissa. Kuvassa 15 on esitetty lämmön- ja kosteudensiirron tarkastelussa käytetty elementtiverkko. Virtauslaskennassa käytetty verkko luotiin samaan tapaan, mutta siinä oli pieniä poikkeuksia. Virtauslaskennan elementtiverkko oli tiheämpi tuuletusvälin alueella, jotta tulokset saatiin tarkemmiksi ilmapvirtausten osalta.

Oikein määritetty elementtiverkko on tärkeä laskennan ja laskentatulosten kannalta. Verkon ollessa liian tiheä laskentaan kuluu kohtuuttoman paljon aikaa, eivätkä tulokset kuitenkaan ole merkittävästi tarkempia. Liian harva elementtiverkko puolestaan ei anna laskennasta luotettavia tuloksia tai laskenta ei onnistu ollenkaan. Verkon määrittämiseen ja optimointiin sain apua Comsol -ohjelmiston asiantuntijalta.



Kuva 15. Comsol Multiphysics-ohjelmistossa luotu elementtiverkko

Kun elementtiverkko on optimoitu oikeanlaiseksi, voidaan aloittaa mallin ratkaisu. Sadetakkipellitetyssä rakenteessa ulomman tuuletusvälin ilmavirtaukset jätetään mallintamatta. Tämä johtuu siitä, että laskenta menisi turhan monimutkaiseksi ja virheiden mahdollisuus kasvaisi. Oletuksella, että sadetakkipelti on täysin vedenpitävä, voidaan myös kosteusteknisen toiminnan tarkastelu aloittaa vasta sisemmästä tuuletusvälistä. Laskennassa sisempään tuuletusväliin siirtyy kosteutta ainoastaan tuuletusrakojen kautta tapahtuvien ilmavirtausten mukana. Näin ulomman tuuletusvälin ilmavirtauksilla ei ole vaikutusta laskentaan. Valituilla asetuksilla päästään tulosten puolesta parhaaseen lopputulokseen. Lämmönsiirtyminen ratkaistaan kuitenkin koko rakenteen läpi.

Toisessa tutkittavassa seinärakenteessa, jossa sadetakkipeltiä ei ole käytetty, ratkaisu tapahtuu kaikilta osin koko rakenteen läpi. Kosteusteknisen toiminnan mallinnusprosessi poikkeaa siis ensimmäisestä seinärakenteesta.

Tarkasteltaessa sadetakkipellitämätöntä seinärakennetta ulkoverhous ajatellaan vedenpitäväksi. Laskennasta jätettiin sateen vaikutukset pois. Tähän ratkaisuun päädyttiin, koska Jokioisen ilmastollisia testivuosi käytetään yleensä laskelmissa, joissa ulkoilman suhteellinen kosteus aiheuttaa suurimman kosteuskuorman rakenteelle. Kosteutta siirtyy siis tuuletusväliin tässäkin tapauksessa vain tuuletusraon kautta tapahtuvien ilmavirtausten mukana. Todellisuudessa ulkoverhouksen saumakohdista voi kuitenkin päästä kosteutta ja vapaata vettä tuuletusväliin. Tämä tulee ottaa huomioon tulosten analysoinnissa.

Mallin ratkaisu tapahtuu kummassakin seinärakenteessa kahdessa osiossa. Ensiksi ratkaistaan ilmavirtausten aiheuttama virtauskenttä jatkuvuustilassa. Tämä laskenta on suhteellisen nopea suorittaa. Virtauslaskennasta saadut tulokset otetaan tämän jälkeen käyttöön lämmön- ja kosteudensiirron laskennassa. Näin ilmavirtausten vaikutukset saadaan laskentaan mukaan ja tuloksista tulee todennukaisia.

Lämmön- ja kosteudensiirron laskenta tapahtuu käyttäen ajasta riippuvaa ratkaisuperustetta (Time Dependent Solver). Laskentaan määritetään haluttu ajan-

jakso ja tarkasteluvälit, joilla laskenta suoritetaan. Tässä työssä rakenteiden toimintaa tarkastellaan vuoden mittaisella ajanjaksolla 12 tunnin välein. Näin saadaan kattava kuva rakenteen toiminnasta ympärivuotisissa olosuhteissa.

Yhden laskentamallin ratkaisuun ohjelmistolla meni aikaa noin kaksi–kolme vuorokautta. Laskenta sisältää suuren määrän tietoa ympäröivistä olosuhteista sekä käytetyistä materiaaleista ja niiden ominaisuuksista. Lisäksi mallin geometrian rinnakkaiset kerrokset lisäävät laskentakuormaa ja -aikaa.

6.3.2 Laskentatulokset

Laskentatulosten tulkinta ja analysointi vaativat rakennusfysiikan tuntemusta sekä ammattitaitoa. Tuloksia tulkittaessa on mietittävä todellisia tilanteita sekä rakenteiden käyttäytymistä, jotta laskennan mahdolliset virheet ja epätarkkuuskijät voidaan havaita.

Tässä työssä laskentatulokset ovat muotoutuneet useiden eri tekijöiden yhteisvaikutuksesta ja tuloksia tulkittaessa pyrittiin selvittämään, mitkä asiat rakenteen käyttäytymiseen vaikuttavat. Tärkeää oli muodostaa kokonaisuus rakenteen kosteusteknisestä toiminnasta valituissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa. Lisäksi selvitettiin sadetakkipellin sekä kaksinkertaisen tuuletusvälin vaikutusta termorankaseinän kosteustekniseen toimintaan. Laskennassa käytetyt olosuhteita kuvaavat funktiot on esitetty liitteessä 4.

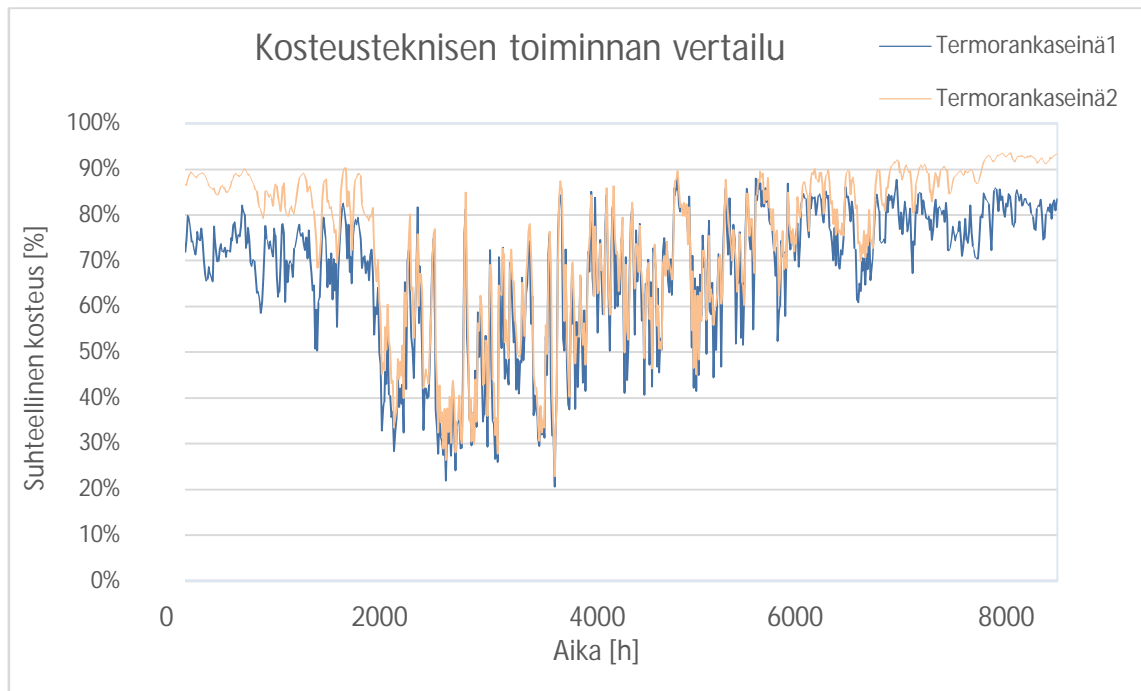
Rakenteiden kosteustekninen käyttäytyminen noudatti molemmissa tapauksissa samaa linjaa. Ulkoilman kosteusolojen ollessa kriittiset myös rakenteiden kosteuspitoisuudet nousivat. Lisäksi laskentatulosten kautta pystyttiin analysoimaan myös muiden olosuhdetekijöiden vaikutusta rakenteiden toimintaan.

Rakenteiden suhteelliset kosteudet nousivat ajoittain korkealle tasolle. Tarkasteltaessa tällaisia tilanteita voitiin havaita, että kyseisinä ajan jaksoina myös ulkoilman suhteellinen kosteus oli korkealla. Kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisimmät ulkoilman olosuhdetekijät ajoittuivat pääosin syksyyn sekä talveen. Kesäisin ilman ollessa lämpimämpi ilman suhteellinen kosteus pysyy yleisesti ottaen alhaisempana, jolloin rakennetta kuormittavat kosteusrasitukset jäävät tältä osin

pienemmiksi. Lisäksi ulkoilman ollessa lämpimämpi, myös rakenteen eri kerrokset kestävät lämpimämpinä eikä niissä tapahdu niin suuria lämpötilan muutoksia. Kesäisin myös auringonsäteilyn lämmittävä ja kuivattava vaikutus on suurimmillaan.

Kaksinkertaisen tuuletusvälin sekä sadetakkipellin vaikutusta rakenteen kosteustekniseen toimintaan arvioitiin laskennasta saatujen tulosten pohjalta. Seinärakenteeseen määritettiin tarkastelupiste tuulensuojalevyn sisäpintaan, jotta kyseisen kohdan kosteuspitoisuudet saatiin tarkasti selvitettyä. Tarkastelupisteen päädyin sijoittamaan tuulensuojalevyn sisäpintaan, koska oletan sen olevan kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisin paikka. Tuloksista havaittiin, että sadetakkipellitetyyn rakenteen eri kerrosten suhteelliset kosteudet pysyivät pääsääntöisesti alhaisempina verrattuna toiseen tutkittuun seinärakenteeseen. Tuulensuojan sisäpinnassa ero oli keskimäärin noin 7 %-yksikköä. Suurimmillaan ero oli 28 %-yksikköä. Ajoittain suhteelliset kosteudet nousivat kuitenkin korkeammaksi sadetakkipellitetyssä rakenteessa. Tällöin ero oli suurimmillaan vain 8 %-yksikköä.

Kuvassa 16 on esitetty molempien seinärakenteiden suhteelliset kosteudet ajanfunktiona. Tulokset ovat tuulensuojalevyn sisäpinnasta. Sininen käyrä (Termorankaseinä 1) kuvaa sadetakkipellitettyä rakennetta. Tuloksista voidaan havaita rakenteiden samantapainen käyttäytyminen mutta myös kaksinkertaisesta tuuletusvälistä saatava hyöty.



Kuva 16. Suhteelliset kosteuden tuulensuojalevyn sisäpinnassa ajan funktiona. Aika 0 h vastaa ajanhetkeä 01.01. klo 00:00

Eniten hyötyä kaksinkertaisesta tuuletusvälistä ja sadetakkipellistä on viileinä vuodenaikoina, jolloin rakenteen toiminta on muutoinkin kriittisimmillään. Lisäksi tarkasteltaessa sadetakkipellittämättömää rakennetta laskenta ei huomioi ulkoverhouksen ja sen saumojen läpi mahdollisesti siirtyvää kosteutta. Todellisuudessa erot rakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ovat siis suuremmat.

Tarkastellaan esimerkiksi ajanhetkeä $t = 638$ h. Kyseinen ajanhetki sijoittuu talveen. Sadetakkipellitetyssä rakenteessa suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn sisäpinnassa on 72 %, vastaavasti sadetakkipellittämättömässä rakenteessa vastaava luku on 86 %.

Kaksinkertaisen tuuletusvälin ja sadetakkipellin ansiosta sisemmät rakennekerrokset välttyvät sateen aiheuttamilta kosteusrasituksilta. Lisäksi kaksinkertainen tuuletusväli ja sadetakkipelti kasvattavat rakennepaksuutta ja parantavat tätä kautta rakenteen kokonaislämmönvastusta. Tarkasteltaessa rakenteiden lämpötiloja tuulensuojalevyn sisäpinnassa havaittiin, että sadetakkipellitetyssä raken-

teessa lämpötila oli keskimäärin 2,4 °C korkeampi kuin toisessa seinärakenteessa. Jo pelkästään tämän lämpötila eron takia suhteelliset kosteudet pysyvät alhaisempina sadetakkipellitetyssä rakenteessa.

Sadetakkipellin käyttö sekä kaksinkertainen tuuletusväli parantavat seinärakenteen kosteusteknistä toimintaa. Rakennerratkaisuja sekä käytettyjä materiaaleja on kuitenkin aina mietittävä tapauskohtaisesti, jotta löydetään kohteeseen soveltuvin ratkaisu.

7 Yhteenveto ja päätelmät

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin tuulettuvien rakennerratkaisujen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan sekä laadittiin tuulettuvan kevytrakenteisen ulkoseinän laskentamalli Comsol Multiphysics 5.3a -ohjelmistolla. Simulointi- ja mallinutusprosessin tavoitteena oli selvittää kaksinkertaisen tuuletusvälin vaikutusta rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Tutkittavana seinärakenteena oli termorankaseinä.

Rakennusfysiikka on laaja kokonaisuus, jonka hallitseminen vaatii kokemusta ja ammattitaitoa. Rakennusfysiikassa on pystyttävä hahmottamaan suuria kokonaisuuksia sekä on ymmärrettävä, mikä asia vaikuttaa mihinkin. Kokemus ja ammattitaito korostuvat myös erilaisten rakennusfysikaalisten laskentatulosten analysoinnissa. Tuloksia tulkittaessa on pyrittävä selvittämään, kuinka rakenne toimii sekä mitkä asiat toimintaan vaikuttavat. Näin voidaan muodostaa kokonaiskuva rakenteen sekä koko rakennuksen toiminnasta ja voidaan laatia toimivia rakennerratkaisuja.

Rakennusfysikaalisesti toimivien rakenteiden suunnittelussa on huomioitava niin käytetyt materiaalit kuin ulkoisetkin olosuhdetekijät. Käytetyillä materiaaleilla voidaan parantaa rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa sekä varmistaa, että rakenne täyttää sille asetetut vaatimukset. Materiaalivalintoja sekä rakennerratkaisuja on kuitenkin aina harkittava tapauskohtaisesti. Ulkoiset olosuhdetekijät muodostavat rakenteille rasitusympäristön, joka suurelta osin määrittää sen, mitä rakenteiden tulee lämpö- ja kosteusteknisestä näkökulmasta kestää.

Rakenteiden toimintaa on hyvä tarkastella laskennallisesti. Laskentatulosten pohjalta voidaan selvittää rakenteen toimintaa ja mahdollisia ongelmakohtia. Tulosten tulkinta vaatii tekijältä kokemusta rakennusfysiikasta, koska tulokset eivät aina ole yksiselitteisiä ja rakenteen käyttäytymistä on arvioitava muutenkin kuin pelkkien laskentatulosten pohjalta.

Monifysikaalisten ongelmien simulointiin ja mallinnukseen tarkoitettu Comsol Multiphysics -ohjelmisto on monipuolinen työkalu erilaisten ongelmien ratkaisuun. Ohjelmisto pystyy tehokkaasti huomioimaan useita rakenteiden toimintaan vaikuttavia tekijöitä kerrallaan. Tätä kautta se pystyy myös tarjoamaan tarkkoja sekä todenmukaisia tuloksia. Ohjelmiston käyttö vaatii kuitenkin kokemusta ja ymmärrystä ohjelmiston laskentaperiaatteista, jotta laskentamallista saadaan toimiva kokonaisuus, jonka tulokset ovat oikeanlaisia. Tämän takia onkin erityisen tärkeää, että tulosten tulkinnassa huomioidaan laskennan mahdolliset poikkeamat ja pyritään selvittämään, miksi rakenne toimii niin kuin se toimii.

Opinnäytetyötä tehdessäni opin paljon uutta rakennusfysiikasta sekä syvensin osaamistani jo tutummilla osa-alueilla. Minulle alkoi hahmottua kokonaisuus ja opin ymmärtämään, millainen vaikutus vallitsevilla olosuhteilla on rakenteiden toiminnan kannalta. Lisäksi minulle muodostui käsitys siitä, millaisia asioita rakennusfysiikan suunnittelussa tulee ottaa huomioon. Toimivia rakenteita suunniteltaessa on huomioita niin käytetyt materiaalit kuin myös rakenteita rasittavat ulkoiset tekijät. Opittavaa jäi kuitenkin vielä paljon ja uskon, että taidot kehittyvät, kun saan enemmän työkokemusta rakennusfysiikan suunnittelun parissa.

Suuri osa tätä opinnäytetyöprosessia oli Comsol Multiphysics -ohjelmiston käyttööntulon opettelu sekä sillä tehtävät laskentatarkastelut. Ohjelmiston monipuolisuuden ja laajuuden takia opetteluun kuluikin paljon aikaa ja siinä esiintyi myös haasteita. Opinnäytetyössä perehdyin ohjelmiston lämmön- ja kosteudensiirto moduulin käyttöön, sekä lisäksi syvennyin myös virtauslaskentaosioon. Muihin osa-alueisiin en tämän työn puitteissa tutustunut. Uskon kuitenkin, että ohjelmiston muut osa-alueet on nyt helpompi ottaa käyttöön, kun perustietämys ohjelmiston toimintaperiaatteista on hankittu.

Lopputuotteena laaditut termorankaseinien laskentamallit vaativat paljon aikaa ja kärsivällisyyttä. Onnekseni sain tarvittaessa apua Comsol-ohjelmiston asiantuntijalta. Laskennassa oli mukana niin paljon eri tekijöitä, että kokonaisuuden muodostaminen ja hahmottaminen osoittautuivat ajoittain haastaviksi. Laskennan kanssa syntyneet ongelmat saatiin kuitenkin ratkaistua ja ohjelmiston käyttö alkoi sujua.

Laskentatulosten analysoinnin sekä tehtyjen vertailulaskelmien pohjalta tuloksia voidaan pitää oikeellisina. Perehdyin seinärakenteiden toimintaan ympärivuotisissa olosuhteissa ja pyrin selvittämään, mikä vaikuttaa niiden käyttäytymiseen eri aikoina. Kun kaikki olosuhdetekijät sekä laskennasta saadut tulokset otetaan huomioon, voidaan laskennan todeta onnistuneen.

Laskentamallia voitaisiin tulevaisuudessa vielä kuitenkin kehittää. Laskentaan voitaisiin määrittää tuuletusvälissä tapahtuvat ilmavirtaukset vielä tarkemmin. Ilmavirtaukset voitaisiin ratkaista erinäisten funktioiden avulla, jolloin ulkoisten olosuhdetekijöiden vaikutus saataisiin laskentaan mukaan myös niiltä osin.

Ilmavirtausten ajasta riippuva ratkaisu tekisi kuitenkin mallista huomattavasti raskeamman ja laskenta kestäisi todennäköisesti kohtuuttoman kauan. Lisäksi ilmavirtausten vaikutus rakenteen kosteustekniseen toimintaan saatiin huomioitua, vaikka virtausnopeutena käytettiin vakioarvoa. Lisäksi ilmavirtausten tarkempi mallintaminen ja niihin perehtyminen vaatisi huomattavasti enemmän virtaustekniikan teorian opiskelua, josta minulla ei etukäteen ollut kokemusta.

Laskennassa ilmavirtausten ajateltiin tapahtuvan ainoastaan tuuletusvälissä. Todellisuudessa ilmavirtauksia voi esiintyä myös eristekerroksessa. Eristeessä tapahtuvan sisäisen konvektion mallintaminen olisi myös mahdollista liittää laskentaan mukaan. Tämän työn puitteissa se jätettiin kuitenkin mallinnus- ja simulointiprosessin ulkopuolelle.

Lisäksi sisäilman kosteuslisän mitoitusarvo voitaisiin määrittää tarkemmin kuvan 12 mukaan (s.44). Tässä työssä arvona käytettiin 5 g/m^3 ympäri vuoden. Lämpiminä vuodenaikoina kosteuslisän mitoitusarvona voitaisiin käyttää pienempää arvoa, joka vähentää rakenteelle tulevaa sisäpuolista kosteuskuormaa. Todellisuudessa rakenne toimii siis paremmin kuin mitä laskenta osoittaa.

Sateen vaikutusta sadetakkipellittämättömän rakenteen kosteustekniseen toimintaan voitaisiin tämän laskentamallin pohjalta alkaa myös viemään eteenpäin. Sateen vaikutusten mallintaminen vaatisi kuitenkin ulkoverhouksen saumakoh-
tien yksityiskohtaista mallintamista sekä uusien reunaehtojen määrittämistä. Tämä kuitenkin vaatisi sen verran paljon aikaa, että se voisi olla itsessään opin-
näytetyö. Tästä syystä sateen vaikutusten analysointi ja mallintaminen jätettiin
tämän työn ulkopuolelle.

Mielestäni Comsol Multiphysics soveltuu hyvin simulointi- ja mallinnusprosessei-
hin, joissa tutkitaan useita erilaisia fysiikan ilmiöitä kerrallaan. Ohjelmisto pystyy
ratkaisemaan monimutkaisia tilanteita sekä huomioimaan useita niihin vaikuttavia
tekijöitä. Ohjelmiston sujuva käyttö vaatii kuitenkin paljon opettelua ja perehty-
mistä ohjelmiston toimintaperiaatteisiin. Tämän takia en usko, että sitä päivittäi-
sissä suunnittelutehtävissä tullaan käyttämään. Suurempien kokonaisuuksien
ratkaisuissa sekä tutkimustyössä ohjelmisto on mielestäni kuitenkin toimiva työ-
kalu.

Kokonaisuutena opinnäytetyö opetti minulle paljon rakennusfysiikasta. Lisäksi
erilaiset laskentamenetelmät ja työkalut tulivat tutuiksi. Uskon taitojen vielä kehiti-
tyvän, kun pääsen työskentelemään rakennusfysikaalisten suunnittelutöiden pa-
rissa.

Kuvat

Kuva 1. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona, s. 26

Kuva 2. Comsol Multiphysics- ohjelmiston käyttöliittymä, s.28

Kuva 3. Betonisandwich-elementti, s.31

Kuva 4. Sandwich-elementin lämpötilajakauma, analyyttinen ratkaisu, s.33

Kuva 5. Sandwich-elementin kosteuspitoisuudet, analyyttinen ratkaisu, s.33

Kuva 6. Comsol Multiphysics -ohjelmistolla tehty fysiikan kontrolloima betonielementtiseinän elementtiverkko, s.36

Kuva 7. Rakenteen lämpötilajakauma ratkaistuna Comsol Multiphysics -ohjelmistolla, s.37

Kuva 8. Rakennekerrosten kosteuspitoisuudet ratkaistuna Comsol Multiphysics -ohjelmistolla, s.38

Kuva 9. Tuulettuva ulkoseinärakenne ja laskennan lähtöarvot, s.40

Kuva 10. Termorankaseinä 1, s.42

Kuva 11. Termorankaseinä 2, s.43

Kuva 12. Termorankaseinän geometrinen malli Comsol Multiphysics:ssä, s.44

Kuva 13. Laskentaa varten puolitettu seinärakenteen geometrinen malli, s.45

Kuva 14. Esimerkki Comsol Multiphysics- ohjelmistossa käytetystä funktiosta, s.46

Kuva 15. Comsol Multiphysics- ohjelmistossa luotu elementtiverkko, s.49

Kuva 16. Suhteelliset kosteuden tuulensuojalevyn sisäpinnassa ajanfunktiona. Aika 0 h vastaa ajanhetkeä 01.01. klo 00:00, s. 53

Taulukot

Taulukko 1. Ulkoseinärakenteiden lämmönläpäisykertoimien $[W/(m^2 K)]$ kehittyminen, s.13

Taulukko 2. Sisäilman kosteuslisät, s.25

Taulukko 3. Pintavastukset, s.32

Taulukko 4. Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus ja kyllästysosapaine lämpötilan funktiona, s.35

Taulukko 5. Sandwich-elementin vertailu laskelmien tulokset, s.39

Lähteet

Björkholtz, D 1997. Lämpö ja kosteus rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto Oy

BY 64 2016. Tuulettuvat julkisivut. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys.

Comsol 2018a. <https://www.comsol.fi/company> Luettu 05.06.2018.

Comsol 2018b. <https://www.comsol.fi/comsol-multiphysics> Luettu 05.06.2018.

livonen, P. Opetusmonisteet S-92. Tuuletusraot ja niiden toiminta. Espoo: Ota-tieto Oy

Ilmatieteenlaitos. <http://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testi-vuodet>. Luettu 7.6.2018.

Rafnet-ryhmä 2004. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille. Kosteus. http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus_27092004.pdf Luettu 08.07.2018.

Ramboll Finland Oy. http://www.ramboll.fi/ramboll_finland_oy Luettu 18.06.2018.

RIL 107-2012. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohje. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

RIL 250-2011. Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

RIL 255-1-2014. Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

RT05-10710. 1999. Kosteus rakennuksissa. RT-ohjekortti. Rakennustieto Oy. Luettu 10.03.2018.

Ruukki 2018. <https://www.ruukki.com/fin/b2b/tuotteet/kantavat-ja-muut-profiilit/kevytorret/lightweight-purlins-details/termo-purlin> Luettu 29.06.2018.

Schöck Bauteile GmbH. 2015. Rakennusfysiikan käsikirja. Rakennusten kylmäsiilat. [http://www.schoeck.fi/upload/files/download/Kylmaesiltaopas\[6079\].pdf](http://www.schoeck.fi/upload/files/download/Kylmaesiltaopas[6079].pdf) Luettu 18.06.2018.

SFS-EN ISO 6946:2017: en. Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Luettu 12.05.2018.

Siikanen, U. 2012. Rakennusten lämpö- ja kosteufysikaalisia näkökohtia. <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK120401.pdf> Luettu 11.03.2018.

Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka: Perusteet ja sovelluksia. 2014. Rakennustieto Oy, Helsinki.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. C3 Lämmöneristys 1976.
<http://www.ym.fi/download/noname/%7B02831F23-08E6-4B9E-9E39-A923CA8DD37A%7D/100663> Luettu 20.07.2018.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. C3 Lämmöneristys 1978.
<http://www.ym.fi/download/noname/%7B25A38801-C03A-4172-B35F-8D923D6E1CAA%7D/100538> Luettu 20.07.2018.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. C3 Rakennusten lämmöneristys 1985.
<http://www.ym.fi/download/noname/%7BCA9A3363-CC70-48E3-8AAB-C04A8ED9BCF0%7D/100665> Luettu 20.07.2018.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. C3 Rakennusten lämmöneristys 2003.
<http://www.ym.fi/download/noname/%7B926E23F8-D52D-4129-98AB-7A21693D8B14%7D/101088> Luettu 20.07.2018.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. C3 Rakennusten lämmöneristys 2007.
<http://www.ym.fi/download/noname/%7BD6B713D7-B1DB-4A1E-BCA6-B611D8DB4589%7D/101089> Luettu 20.07.2018.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. C3 Rakennusten lämmöneristys 2010.
<http://www.ym.fi/download/noname/%7B7BF051A7-6436-4724-A1FD-7688A56FB09B%7D/102966> Luettu 20.07.2018.

TTY Tutkimusraportti 159 2013. Ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampere. https://tutcris.tut.fi/portal/files/956015/vinha_ilmastonmuutoksen_ja_lammoneristyksen_lisayksen_vaikutukset.pdf Luettu 20.05.2018.

Vinha, J. Rakennusfysiikan perussäännöt suunnittelussa ja rakentamisessa. <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK080303.pdf> Luettu 11.03.2018.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma Luettu 12.06.2018.

Rakennustuotteiden tuotehyväksyntä. http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Rakentamisen_ohjaus/Rakennustuotteiden_tuotehyvaksynta/CE-merkinta Luettu 12.06.2018.

Ympäristöopas 2016. Ympäristöministeriö. Luettu 13.08.2018.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdesta 1009/2017.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017.

Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta 782/2017.

Lämpö- ja kosteustekninen tarkastelu

Esimerkki rakenne: Betonisandwich-elementti

Lähtötiedot:

Rakennepaksuudet:

betoni, sisäkuori	150	mm
EPS-eriste	200	mm
betoni, ulkokuori	100	mm

Materiaaliominaisuudet:

Betoni

λ	1,7	W/mK
Z_{pi}	50	m ² sPa/kg

EPS-eriste

λ	0,036	W/mK
Z_{pi}	25	m ² sPa/kg

Huom. Materiaalien vesihöyrynvastus

määritetty kerrospaksuudelle 100 mm

Rakenteen kerrospaksuudet huomioitu taulukon arvoissa

Pintavastukset:

R_{si}	0,13	m ² K/W
R_{se}	0,04	m ² K/W

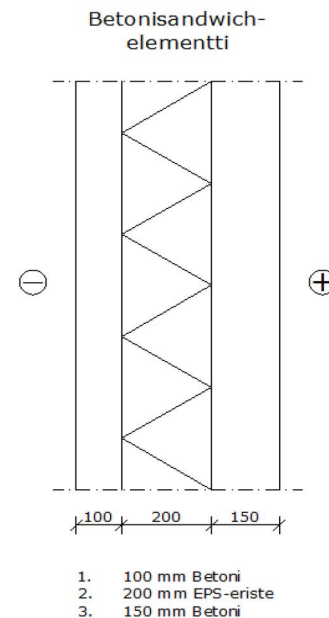
Olosuhteet:

Sisäilma:

T_i	21	°C
R_{Hi}	40 %	

Ulkoilma:

T_e	0	°C
R_{He}	75 %	



kerros	d [m]	λ [W/mK]	Ri [m2K/W]	Ri/RT	ΔT [°C]	T [°C]	Pvk [Pa]	Zpi [m2sPa/kg] x10 ⁹	Zpi/ΣZpi	Δ Pvi	Pvi [Pa]	RH %	vk [g/m3]	v [g/m3]
						21	2486,2				994,4769	40 %	18,31	7,326
Rsi	-	-	0,13	0,022	0,465	20,535	2416,1	-	-	-	994,4769	41 %	17,83	7,326
betoni	0,15	1,7	0,09	0,015	0,316	20,220	2369,4	75	0,42857	229,875	764,602	32 %	17,51	5,649
EPS	0,2	0,036	5,56	0,946	19,866	0,353	626,7	50	0,28571	153,250	611,351	98 %	4,97	4,852
betoni	0,1	1,7	0,06	0,010	0,210	0,143	617,2	50	0,28571	153,250	458,1013	74 %	4,90	3,638
Rse	-	-	0,04	0,007	0,143	0	610,8	-	-	-	458,1013	75 %	4,85	3,638
Σ			5,87					175						

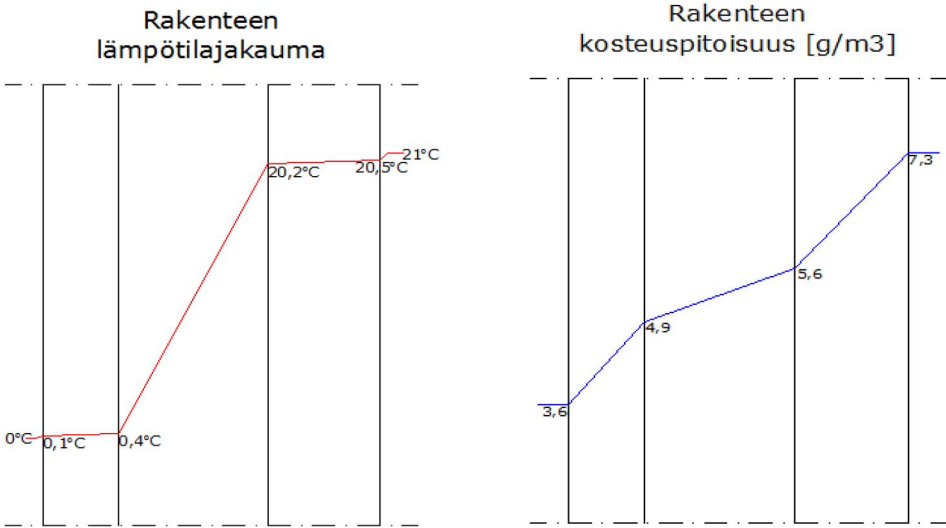
Rakenteen kokonaislämmönvastus:

R_T 5,87 m2K/W

Lämmönläpäisykerroin:

U-arvo 0,17 W/m2K

Kaavat:
Ri = d/λ
RT = ΣRi
U = 1/RT
ΔT = Ri/RT*(Ti - Te)
ΔPvi = Zpi/ΣZpi*(Pvi,i - Pvi,e) , jossa
Pvi,i = sisäilman vesihöyrypitoisuus
Pvi,e = ulkoilman vesihöyrypitoisuus
v = vk*RH%

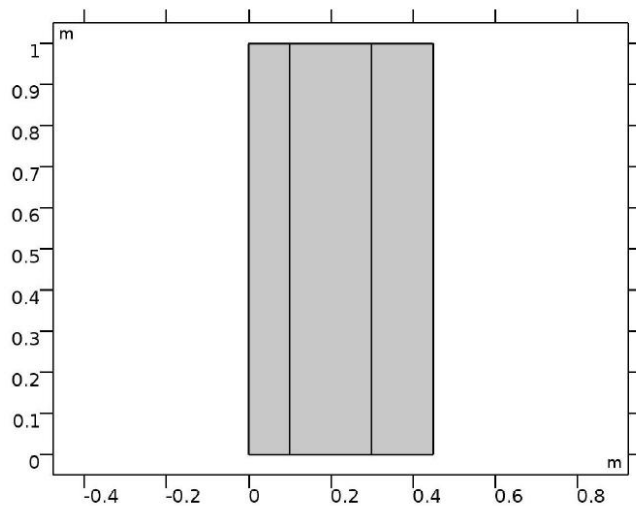


Betonisandwich-elementti

1. Laskennassa käytetyt parametrit

Nimi	Laskennassa käytetty arvo	Selite
d1	100 mm	Betoni, ulkokuori
d2	200 mm	Lämmöneriste
d3	150 mm	Betoni, sisäkuori
R _{si}	0,13 m ² K/W	Sisäpinnan pintavastus
R _{se}	0,04 m ² K/W	Ulkopinnan pintavastus
T _e	0 °C	Ulkoilman lämpötila
RH _e	75 %	Ulkoilman suhteellinen kosteus
T _i	21 °C	Sisäilman lämpötila
RH _i	40 %	Sisäilman suhteellinen kosteus

2. Rakenteen geometria



3. Materiaaliominaisuudet

3.1. Betoni

»	Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/>	Vapor permeability	delta_...	2e-12	s	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Water content	w_c	w_conc(...	kg/m ³	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Thermal conductivity	k_iso ;...	1.7	W/(m·...	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Diffusion coefficient	D_iso ;...	0.2e-12	m ² /s	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	2300	kg/m ³	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Heat capacity at constant pres...	Cp	850	J/(kg·K)	Basic

Laskennan käyttämät materiaaliominaisuudet (Comsol Multiphysics)

3.2. Lämmöneriste

»	Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/>	Thermal conductivity	k_iso ;...	0.036	W/(m·...	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	20	kg/m ³	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Heat capacity at constant pres...	Cp	1300	J/(kg·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Water content	w_c	w_mat(...	kg/m ³	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Vapor permeability	delta_...	4e-12	s	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Diffusion coefficient	D_iso ;...	0.4e-12	m ² /s	Basic

Laskennan käyttämät materiaaliominaisuudet (Comsol Multiphysics)

4. Lämmönsiirto

- Heat Transfer in Building Materials (ht)
 - Building Material 1
 - Initial Values 1
 - Thermal Insulation 1
 - Heat Flux 1
 - Heat Flux 2

Lämmönsiirto laskennanrakenne (Comsol Multiphysics)

Osiossa määritetään lämmönsiirron kannalta keskeiset olosuhdetekijät sekä muut vaadittavat lähtötiedot.

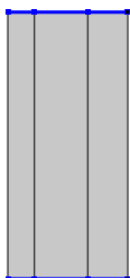
4.1. Building Material

Määritetään kerrokset, joissa lämmönsiirtoa tapahtuu/tutkitaan, sekä kerrosten materiaaliominaisuudet.

4.2. Initial Values

Määritetään alkulämpötila, joista laskenta lähtee liikkeelle.

4.3. Thermal Insulation



Reunaehto, joka määrittää valitut pinnat "suljetuiksi".

→ Tätä kautta ei tapahdu lämmönsiirtymistä

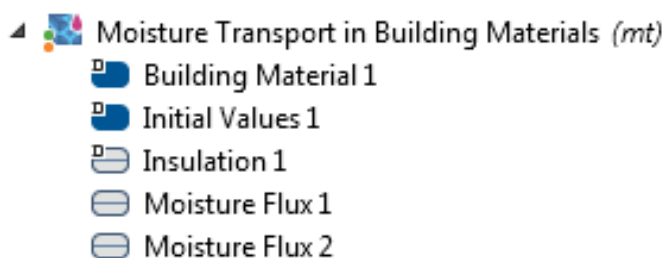
4.4. Heat Flux – ulkopinta

Määritetään ulkoilman lämpötila (T_e) sekä ulkopinnanpintavastus ($1/R_{se}$)

4.5. Heat Flux – sisäpinta

Määritetään sisäilman lämpötila (T_i) sekä sisäpinnanpintavastus ($1/R_{si}$)

5. Kosteudensiirto



Kosteudensiirto laskennanrakenne (Comsol Multiphysics)

Määritetään kosteusteknisen toiminnan keskeiset olosuhdetekijät sekä muut vaadittavat lähtötiedot.

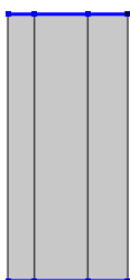
5.1. Building Material

Määritetään kerrokset, joissa kosteudensiirtymistä tapahtuu/tutkitaan, sekä kerrosten materiaaliominaisuudet.

5.2. Initial Values

Määritetään vallitseva suhteellinen kosteus, joista laskenta lähtee liikkeelle.

5.3. Insulation



Reunaehto, joka määrittää valitut pinnat "suljetuiksi".

→ Tätä kautta ei tapahdu kosteudensiirtymistä

5.4. Moisture Flux – ulkopinta

Määritetään ulkoilman lämpötila (T_e), suhteellinen kosteus (RH_e) sekä ulkopinnanpintavastus ($1/R_{se}$)

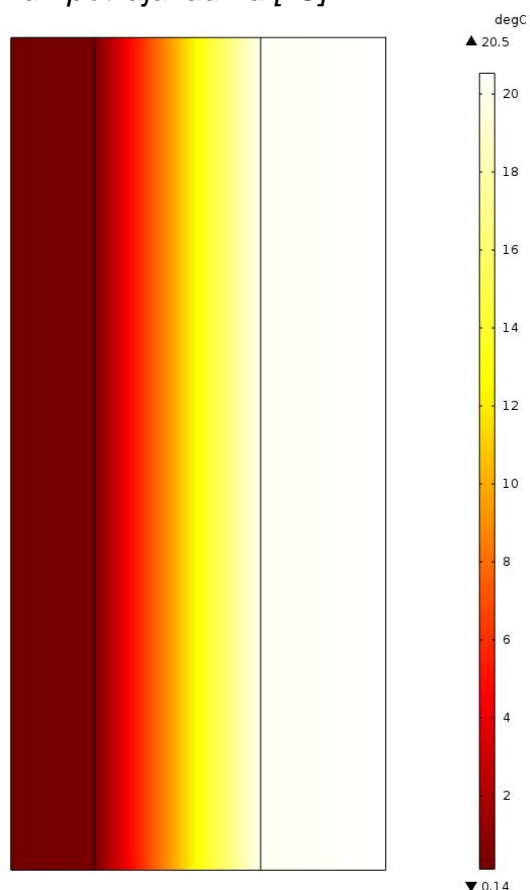
5.5. Moisture Flux – sisäpinta

Määritetään sisäilman lämpötila (T_i), suhteellinen kosteus (RH_i) sekä sisäpinnanpintavastus ($1/R_{si}$)

6. Tulokset

Laskenta suoritettu jatkuvuustilassa

Lämpötilajakauma [°C]



Max. 20,5 °C (rakenteen sisäpinta)

Min. 0,14 °C (rakenteen ulkopinta)

Lämpötilat materiaalien rajapinnoissa:

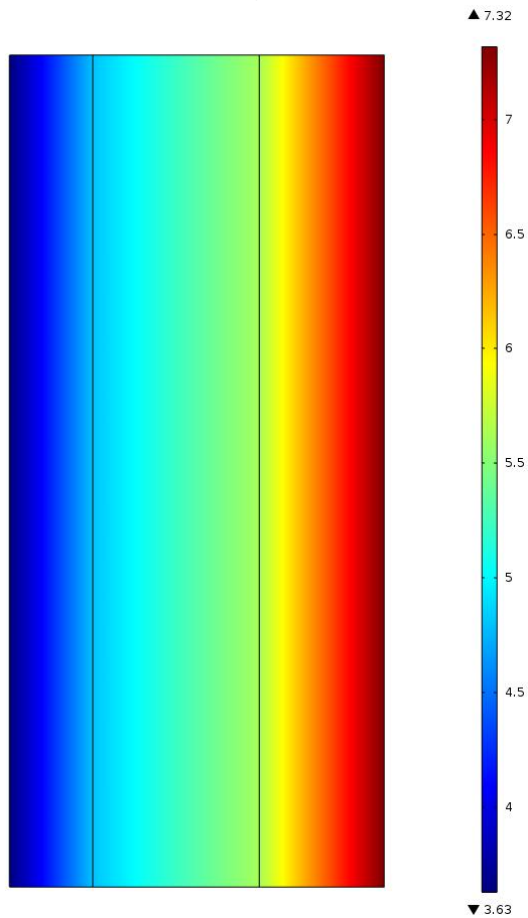
ulkokuori-eriste: 0,35 °C

sisäkuori- eriste: 20,20 °C

Normaalilämpövirta ja U-arvo

Lämpövirta	U-arvo
3,5834 W/m	0,17 W/(m ² K)

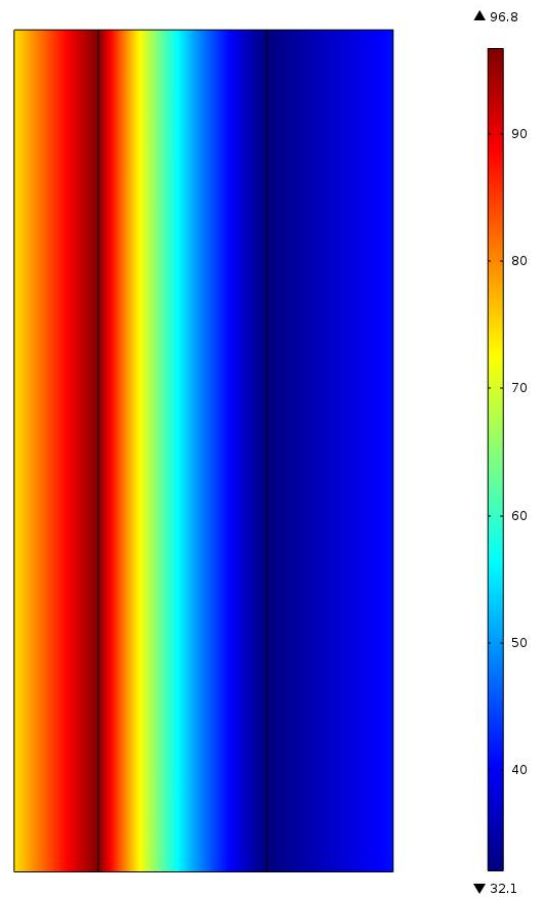
Kosteuspitoisuus [g/m³]



Max. 7,32 g/m³

Min. 3,63 g/m³

Suhteellinen kosteus, RH%



Max. 96,8 %

Min. 32,1 %

Rakenteenkosteuspitoisuudet materiaalien rajapinnassa ja niitä vastaavat suhteellisen kosteuden arvot:

ulkokuori-eriste: 4,80 g/m³, RH 96,8 %

sisäkuori-eriste: 5,62 g/m³, RH 32,1 %

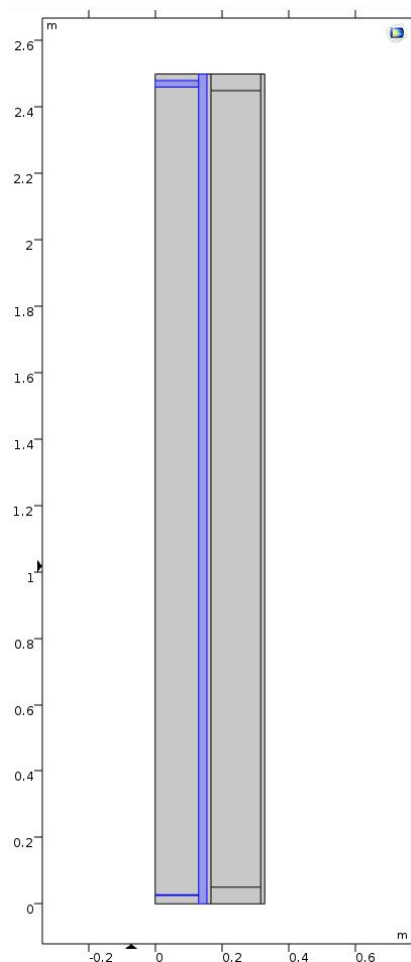
Tuulettuva julkisivurakenne, ilmavirtaukset

1. Laskennassa käytetyt parametrit

Nimi	Laskennassa käytetty arvo	Selite
h	2500 mm	Korkeus
d1	130 mm	Tiiliverhous
d2	25 mm	Tuuletusväli
d3	12 mm	Tuulensuojalevy
d4	150 mm	Eriste + puurunko k600
d5	12 mm	Lastulevy
T_e	-15 °C	Ulkoilman lämpötila
RH_e	90 %	Ulkoilman suhteellinen kosteus
T_i	20 °C	Sisäilman lämpötila
RH_i	50 %	Sisäilman suhteellinen kosteus
R_{se}	0,04 m ² K/W	Ulkopinnan pintavastus
R_{si}	0,13 m ² K/W	Sisäpinnan pintavastus

Lisäksi määritetään sisään- ja ulosvirtauskanavien leveydet ja sijainnit.

2. Rakenteen geometria



Virtausalue merkitty sinisellä










3. Materiaaliominaisuudet

3.1. Tuuletusrakojen ilma

»	Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/>	Dynamic viscosity	mu	16.352e-6	Pa·s	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Ratio of specific heats	gamma	1.4	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Heat capacity at constant pressure	Cp	1006	J/(kg·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	1.36	kg/m ³	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Thermal conductivity	k_iso ; k_ii = ...	22.816	W/(m·K)	Basic










Laskennan käyttämät materiaaliominaisuudet (Comsol Multiphysics)

4. Lämmönsiirto

- ▲  Heat Transfer in Building Materials (ht)
 -  Building Material 1
 -  Initial Values 1
 -  Thermal Insulation 1
 -  Heat Flux 1
 -  Heat Flux 2
 -  Inflow 1
 -  Outflow 1
 -  Moist Air 1

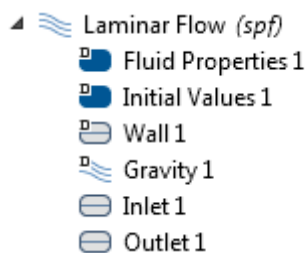
Määritetään lämmönsiirron kannalta keskeiset olosuhdetekijät sekä vaadittavat lähtötiedot virtauslaskennan osalta.

5. Kosteudensiirto

- ▲  Moisture Transport in Building Materials (mt)
 -  Building Material 1
 -  Initial Values 1
 -  Insulation 1
 -  Moisture Flux 1
 -  Moisture Flux 2
 -  Moist Air 1
 -  Moisture Content 1
 -  Outflow 1

Määritetään kosteudensiirron kannalta keskeiset olosuhdetekijät sekä vaadittavat lähtötiedot virtauslaskennan osalta.

6. Virtauslaskenta- Laminar Flow



Määritetään virtausilman ominaisuudet sekä paine-ero sisään- ja ulosvirtauskanavan välille.

Ilman suhteellinen kosteus: RH62 %

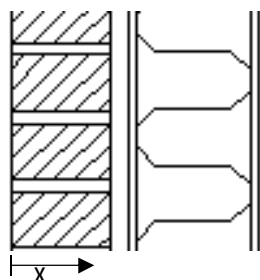
Lämpötila: -11 °C

Paine-ero: 0.512 Pa

7. Tulokset

Ilmavirtauksia tarkasteltiin korkeudella $h = 1250$ mm

Tarkastelu pisteet sijoitettiin tuuletusvälin keskelle (2kpl) ja reuna-alueille (2kpl)



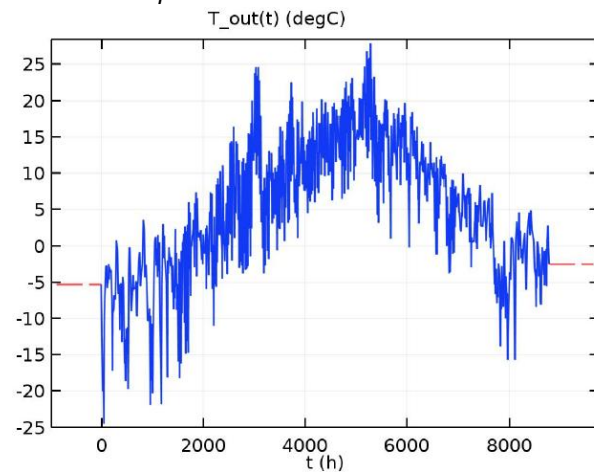
Tarkastelupisteen sijainti	Virtausnopeus m/s
x = 135 mm	0,0047
x = 142 mm	0,0072
x = 143 mm	0,0075
x = 150 mm	0,0047

Tarkastelupisteen sijainti ilmoitettu rakenteen ulkopinnasta

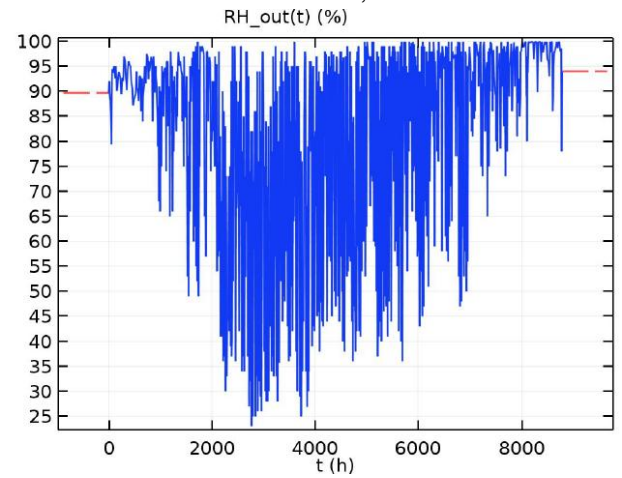
Keskimääräinen virtausnopeus 0,006 m/s

Liite 4
Olosuhdefunktiot

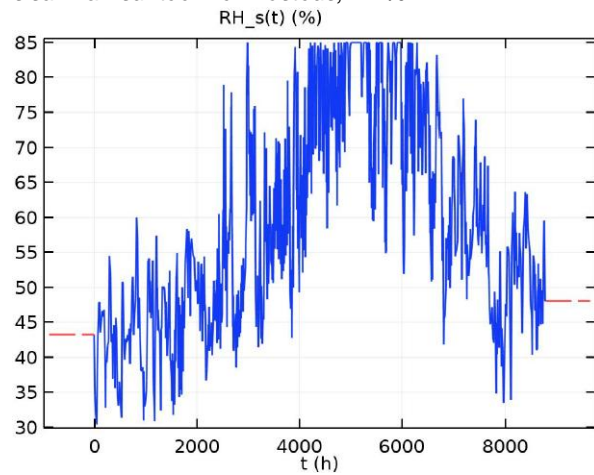
ulkoilman lämpötila °C



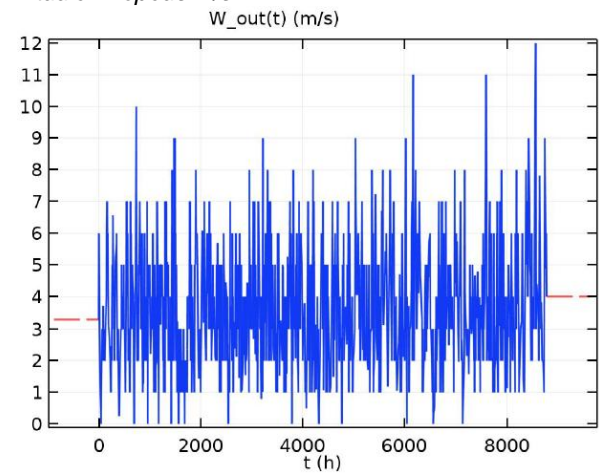
ulkoilman suhteellinen kosteus, RH%



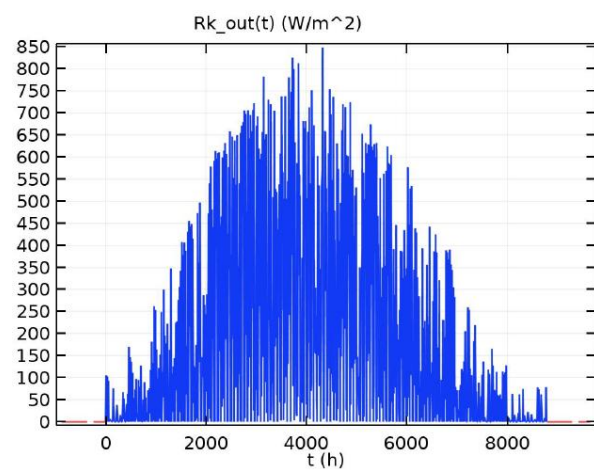
sisäilman suhteellinen kosteus, RH%



tuulen nopeus m/s



kokonaissäteily vaakapinnoille W/m²



kokonaissäteily kohtisuoralle pinnalle W/m²

